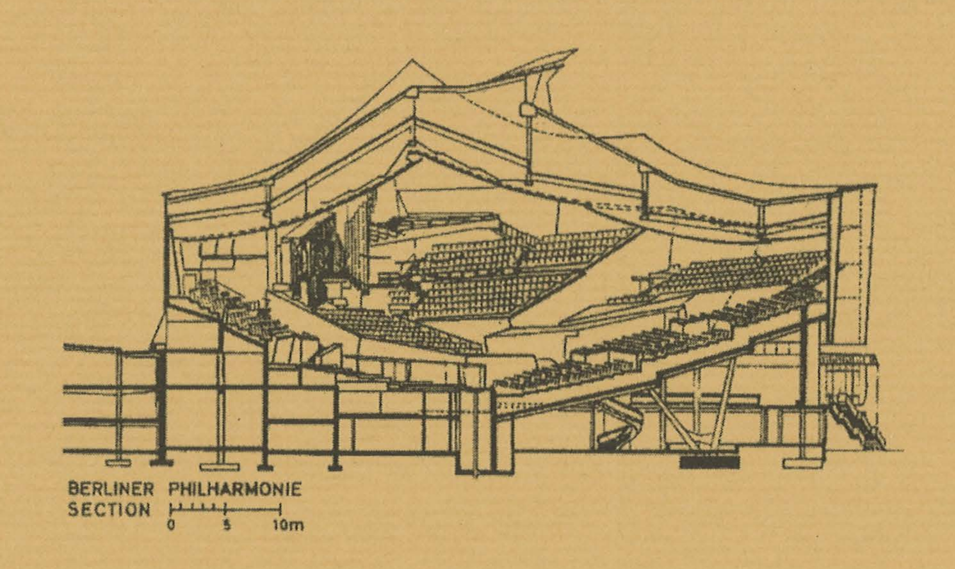
APUNTES DE ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN Y EL URBANISMO (IV)

por

César Díaz Sanchidrián



CUADERNOS DEL INSTITUTO JUAN DE HERRERA DE LA *ESCUELA DE ARQUITECTURA DE MADRID*

2-51-04

APUNTES DE ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN Y EL URBANISMO (IV)

por

CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-51-04

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA

0 VARIOS
1 ESTRUCTURAS
2 CONSTRUCCIÓN
3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
4 TEORÍA
5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
6 PROYECTOS
7 URBANISMO
8 RESTAURACIÓN

NUEVA NUMERACIÓN

2 Área
51 Autor
04 Ordinal de cuaderno (del autor)

Apuntes de acústica en la edificación y el urbanismo (IV)

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Composición y maquetación: Daniel Álvarez Morcillo.
CUADERNO 129.01 / 2-51-04
ISBN: 84-9728-021-0 (obra completa)
ISBN: 84-9728-032-6 (Apuntes IV)
Depósito Legal: M-12122-2002

ÍNDICE

8 ACÚSTICA DE RECINTOS

8.1.- INTRODUCCIÓN

Es fácil apreciar la diferencia entre los sonidos propagados al aire libre y en el interior de un recinto. La principal diferencia es el sonido reflejado. Cuando una fuente sonora emite en un espacio cerrado, las ondas sonoras se propagan en todas las direcciones e inciden sobre las paredes, objetos, mobiliario, etc. Su comportamiento obedece a leyes que dependen principalmente de las características del sonido emitido y de la impedancia de los materiales y objetos sobre los que incide. El sonido también puede ser transmitido a los recintos colindantes.

Los principales factores que intervienen en el campo sonoro del recinto son:

La fuente sonora, caracterizada por su evolución temporal, composición espectral, potencia de la energía sonora emitida, directividad, etc.

El medio de propagación, en general aire. Este se supone homogéneo e isótropo en ausencia de perturbaciones capaces de producir variaciones locales de presión, (condiciones higrotérmicas, corrientes de aire, gradientes de temperatura, etc.).

Naturaleza de las paredes y obstáculos, según la naturaleza de los obstáculos con los que se encuentra el sonido en su propagación, su comportamiento es diferente.

Esencialmente el sonido que se propaga en un recinto cerrado sigue las leyes de la difusión y de la absorción. Los efectos de la difusión se deben principalmente a la superposición de los fenómenos de la reflexión, refracción y difracción. La absorción acústica es consecuencia sobre todo de la refracción-transmisión en la superficie de separación de dos medios y de todas las formas de disipación de energía que están asociadas al proceso.

La acústica de recintos tiene por objeto el estudio del comportamiento y control de la energía sonora en el interior de un recinto en donde se encuentran situadas las fuentes sonoras, eliminando ecos, focalizaciones, modos de resonancia no deseados, controlando el tiempo de reverberación, reduciendo el nivel sonoro debido a las fuentes en el interior del recinto, etc. Su finalidad es lograr la máxima calidad acústica en el recinto de acuerdo con su uso. En esta introducción a la acústica de recintos únicamente se estudiará el comportamiento del sonido en recintos de audición directa. No se considerará la existencia de sistemas electroacústicos ni de amplificación sonora.

Cuando se utiliza la expresión acústica de recintos o de salas, generalmente se asocia a recintos especiales tales como salas de concierto, teatros de opera o drama. Es cierto que estos recintos tienen que tener un comportamiento acústico excelente. Pero por otra parte, existen un gran número de recintos de uso cotidiano tales como dormitorios, salones, restaurantes, cafeterías, aulas, oficinas, talleres, etc. en donde las condiciones acústicas no son las adecuadas y un buen proyecto acústico mejoraría apreciablemente el bienestar de sus ocupantes.

Para estudiar la acústica de un recinto se aplican procedimientos, más o menos complementarios, basados en la acústica geométrica, ondulatoria y estadística.

La *acústica geométrica* estudia la distribución de la energía sonora mediante el trazado de rayos sonoros.

La *acústica ondulatoria* tiene en cuenta la naturaleza ondulatoria del sonido, y trata de resolver la ecuación de ondas teniendo en cuenta las condiciones de contorno.

La *acústica estadística* nos permite de forma sencilla entender los conceptos básicos de los procesos acústicos en el interior de un recinto y obtener un modelo matemático de los mismos. Se supone que se cumplen las leyes del campo sonoro difuso, estas son:
1) Las ondas reflejadas llegan a todos los puntos en el interior del recinto desde diferentes direcciones, siendo todas estas equiprobables.
2) En cualquier punto del espacio, la energía sonora se obtiene sumando aritméticamente los valores medios de las energías de todas las reflexiones que pasan a través de dicho punto.
3) En cualquier instante de tiempo, la densidad de energía sonora en cada punto del recinto es la misma.

Consecuencia de los estudios realizados a lo largo de los años, se ha establecido una correlación entre aspectos subjetivos sobre la calidad acústica de un recinto dedicado a la palabra o a la música, y los parámetros acústicos medibles objetivamente.

Aunque la acústica de recintos está sustentada sobre conocimientos científicos, debe combinarse con la creatividad, intuición y experiencia para obtener una realización práctica eficaz.

Objetivos de un proyecto acústico

Los requisitos para un proyecto acústico adecuado de una sala incluyen el cumplimiento de los siguientes objetivos:
1) Evitar los ruidos molestos exteriores e interiores.
2) La inteligibilidad de la palabra debe ser satisfactoria.
3) La música debe sonar agradable y cálida.
4) El sonido se debe distribuir uniformemente a través de toda la sala.
5) Evitar defectos tales como ecos, focalizaciones, sombras acústicas, etc.

8.2 –LA REVERBERACIÓN DEL SONIDO EN UN RECINTO

Cuando una fuente sonora emite en un espacio cerrado, las ondas sonoras se propagan en todas las direcciones e inciden sobre las paredes, objetos, mobiliario, etc. Su comportamiento obedece a leyes que dependen principalmente de las características del sonido emitido y de la impedancia de los materiales y objetos sobre los que incide.

El sonido en un lugar de un recinto consta del *sonido directo* emitido por la fuente y el sonido difundido por las superficies interiores del recinto y los objetos situados en su interior. El sonido que ha sufrido una o más reflexiones se llama *sonido reverberante.* Un recinto se llama anecoico, es decir sin ecos, si el sonido directo predomina en casi

todos los puntos del recinto. Un recinto que se proyecta con este objetivo se llama *cámara anecoica* o cámara de campo libre, sus superficies interiores absorben todo el sonido que incide sobre ellas. Las *cámaras reverberantes* se diseñan de manera que el campo sonoro es reverberante en casi todo el recinto, sus superficies interiores deben reflejar todo el sonido que incide sobre ellas.

El campo directo depende de las características de la fuente sonora, (nivel de potencia, directividad) y de la distancia entre la fuente y el punto de medida.

El campo reverberante por definición comprende las primeras reflexiones y el campo sonoro difuso.

Cuando una fuente sonora emite en el interior de un recinto un sonido permanente con nivel constante, se produce una primera fase de crecimiento de la energía sonora en el recinto, posteriormente se alcanza un valor constante de establecimiento, y si posteriormente la fuente deja de emitir, se observa un decrecimiento de la energía sonora en el recinto. Las leyes del decrecimiento del sonido en un recinto muestran las propiedades acústicas del mismo, siendo una de las más importantes la duración de la reverberación.

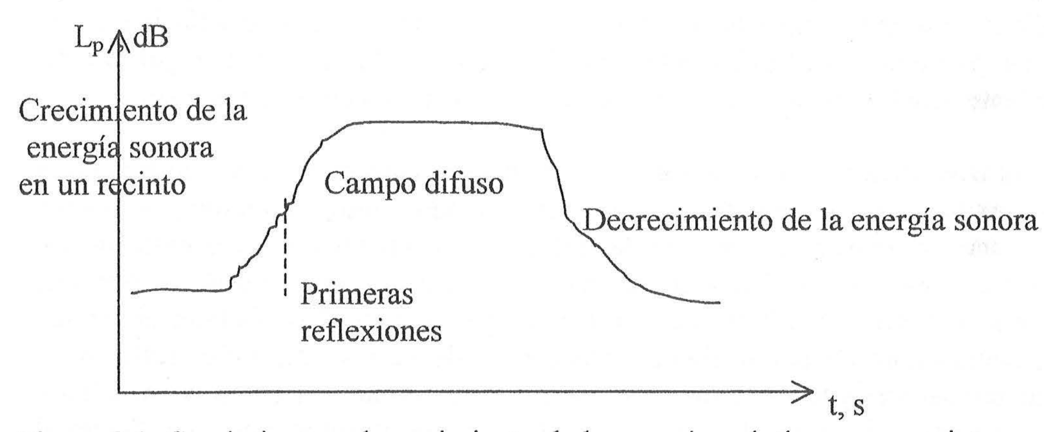


Figura 8.1: Crecimiento y decrecimiento de la energía acústica en un recinto.

Se denomina *reverberación* al proceso de persistencia y disminución de la energía acústica en un espacio total o parcialmente cerrado, después que la fuente ha dejado de emitir, y está producida por las múltiples reflexiones de las ondas acústicas sobre las superficies interiores del recinto.

W.C. Sabine definió el *tiempo de reverberación de un recinto*, como el intervalo de tiempo que debe de transcurrir, para que la energía sonora se reduzca a la millonésima parte, después de que la fuente sonora deja de emitir, equivale a que el nivel de presión acústica disminuye en 60 dB, T_{60}, en segundos. El tiempo de reverberación está relacionado con factores que caracterizan al recinto: volumen, área de los paramentos, absorción de los mismos, intensidad del sonido al desconectar las fuentes, etc. Para cada frecuencia, o bandas de frecuencia existe un tiempo de reverberación.

La figura 8.2 muestra una curva de decrecimiento del nivel de presión acústica en un recinto, el tiempo de reverberación se calcula de la pendiente de la recta de regresión.

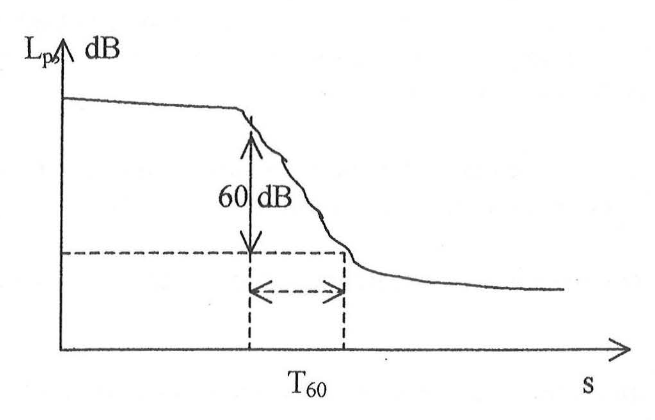


Figura 8.2: Tramo de la curva de decrecimiento del nivel de presión acústica en donde se calcula el tiempo de reverberación.

Otro método de evaluación de la calidad de las señales sonoras transmitidas en un recinto se fundamenta en el estudio local de una señal transitoria determinada. Numerosas investigaciones han demostrado que otros parámetros, además del tiempo de reverberación, también caracterizan la calidad de audición en un recinto, y que de forma más detallada analizan la distribución temporal y espacial del campo acústico en él. Todos estos parámetros se fundamentan en el análisis de la respuesta impulsiva del recinto, estableciendo relaciones energéticas entre las distintas partes de la misma.

La respuesta impulsiva de un recinto describe la distribución de energía acústica en el transcurso del tiempo, que se obtiene en un determinado punto del recinto, producida por una excitación acústica de muy corta duración. En un recinto, el sonido directo emitido por la fuente, puede llegar a cualquier oyente en un intervalo de tiempo que depende de la distancia entre la fuente sonora y el oyente. Poco después llega al oyente, el mismo sonido emitido por la fuente, procedente de varias superficies reflectoras, principalmente paredes y techo, estas reflexiones llegan con un cierto tiempo de retardo t_1, t_2, ..t_n, respecto del sonido directo. Este primer grupo de reflexiones que llegan al oyente en un intervalo de tiempo de aproximadamente 80-100 ms después del sonido directo, se suelen denominar *reflexiones tempranas*. El sonido reflejado que llega con un retardo superior al indicado anteriormente lo hace de forma continua y rápida desde todas las direcciones, fusionándose en el denominado *sonido reverberante*. La figura 8.3 muestra una respuesta de impulso o reflectograma.

A diferencia de los métodos estadísticos utilizados para obtener el tiempo de reverberación T_{60} , la obtención de la respuesta impulsiva está muy relacionada con los métodos propuestos por la acústica geométrica: se parte de la hipótesis que la energía acústica emitida por la fuente se distribuye en un número finito de rayos, que se propagan en el interior del recinto. Cuando un rayo alcanza una superficie del interior del recinto, se refleja en ella, perdiendo parte de su energía debido a la absorción acústica de la superficie. La energía acústica en un determinado punto del recinto se calcula como la suma de las energías de los distintos rayos que confluyen en ese punto en un instante determinado.

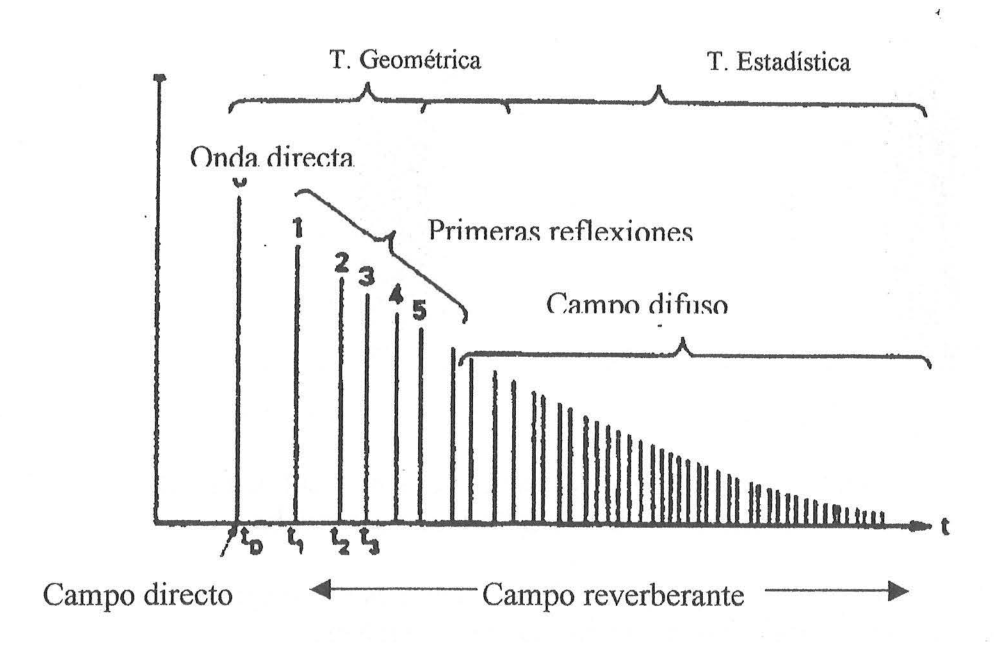


Figura 8.3: Esquema de la distribución temporal de una respuesta de impulso entre una fuente sonora y un punto de recepción en el recinto.

De lo anterior se deduce que la respuesta impulsiva no es un atributo del recinto, tal y como lo era en tiempo de reverberación, sino que es diferente para cada combinación fuente sonora–receptor dentro del recinto. La respuesta impulsiva dependerá en cada caso, de la posición de la fuente y el receptor, de la directividad de la fuente, de la geometría del recinto, así como de la colocación de los materiales o dispositivos absorbentes en su interior. Dependiendo de los datos anteriores, existirán superficies que tendrán una mayor probabilidad de recibir rayos que otras, por lo tanto, la efectividad de un material absorbente acústico, no sólo dependerá de su coeficiente de absorción acústica, sino que también dependerá de la probabilidad de incidencia de las ondas acústicas contra la superficie de dicho material. Algunos programas de simulación de las condiciones acústicas en un recinto, tienen en cuenta esta probabilidad de incidencia.

8.2.1.- EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN Y LA INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA

Es bien conocido el efecto negativo que sobre la inteligibilidad de la palabra en un recinto tiene un tiempo de reverberación elevado del mismo.

La energía acústica que no refuerza el sonido directo, llega a ser un sonido enmascarante para la palabra, reduciendo su inteligibilidad. Al pronunciar una palabra, el nivel de presión acústica de cada sílaba decae durante cada pausa, y enmascara el sonido de la sílaba siguiente. El efecto enmascarante lo podemos ver con un ejemplo sencillo. Supóngase que emitimos las sílabas de la palabra FÍSICA con el mismo nivel de presión sonora en dos recintos, uno con un tiempo de reverberación de 2 s y otro de 0,5 s. La figura 8.4 muestra de forma simplificada que en el recinto con menor tiempo

de reverberación el nivel de presión acústica del sonido enmascarante es menor que cuando el recinto tiene un tiempo de reverberación mayor.

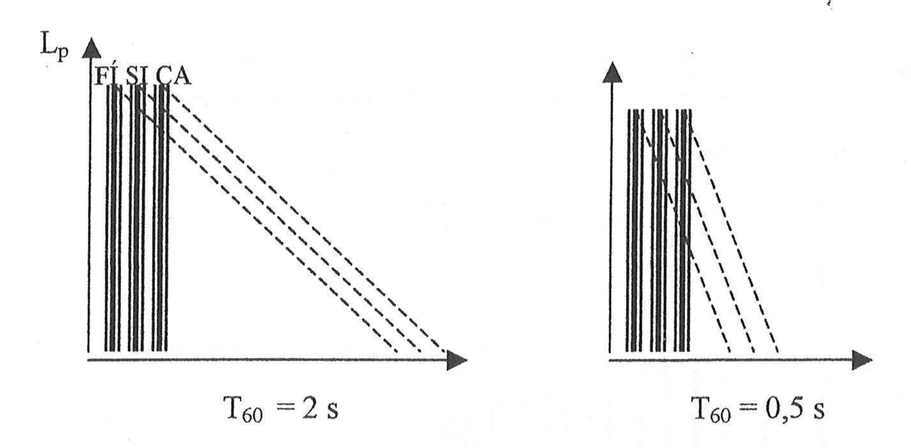


Figura 8.4: Ejemplo simplificado del efecto del tiempo de reverberación sobre la inteligibilidad de la palabra.

La inteligibilidad de la palabra en cada punto de un recinto es una magnitud medible y su dependencia con el tiempo de reverberación esta bien establecida.

El tiempo óptimo de reverberación en un recinto para el uso de la palabra es un compromiso entre la pérdida de inteligibilidad debida a la excesiva reverberación, y la pérdida del nivel sonoro debida a una inadecuada reverberación.

La reverberación también aumenta la distancia dentro de la cual la comunicación oral es posible.

8.2.2.- EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN Y LA MÚSICA

La percepción musical es más subjetiva que la percepción de la palabra.. Durante varias décadas el tiempo de reverberación fue considerado como el único parámetro acústico que afectaba a los atributos musicales de un recinto. En recintos dedicados a la música existen otros parámetros que influyen también en la calidad de la música en un recinto. Los fenómenos acústicos relacionados con los atributos musicales suelen estar clasificados dentro de las dos categorías siguientes:

Atributos relacionados con las reflexiones tempranas: Reverberancia o sensación subjetiva de reverberación, Claridad, Intimidad, Energía lateral, etc.

Atributos relacionados con el sonido reverberante: Espaciosidad, Calor, Brillo, Sonoridad, etc.

En consecuencia, el proyectar espacios para la música es más complejo y el conocimiento en este intrincado campo de la acústica está todavía evolucionando. La variedad de las propiedades acústicas de los recintos musicales está relacionado con la gran diversidad de tipos de música: medievál, barroca, clásica, romántica, sacra, popular, folk, etc. Si a los estilos musicales occidentales le añadimos los orientales la complejidad aumenta.

El carácter variado de los recintos musicales es también debido al gran número de instrumentos musicales diferentes (metal, cuerda, percusión,...). Cada uno de ellos requiere diferentes características acústicas.

8.3.- LA ABSORCIÓN ACÚSTICA

La absorción acústica es un fenómeno físico consecuencia de la disipación de la energía acústica en energía calorífica. En un recinto esta disipación se puede producir mediante la propagación de las ondas acústicas en el aire y en la incidencia con los contornos del recinto (paredes, techo, suelo), o con las personas y objetos situados en su interior.

La cantidad de absorción acústica en un recinto es un factor muy importante en la calidad sonora del mismo, influye de forma decisiva en los fenómenos relacionados con la reverberación, y ante las mismas fuentes sonoras, en la distribución del nivel de presión acústica en el campo reverberante del recinto.

Los materiales y dispositivos absorbentes sonoros se utilizan para controlar el campo acústico en el recinto en función de su uso, y por ello es importante conocer sus características de absorción en función de la frecuencia. En la práctica son absorbentes pasivos del sonido.

8.3.1 *La absorción acústica*

Cuando una fuente sonora emite en un recinto, el nivel de presión sonora en el campo reverberante y el tiempo de reverberación, están afectados por la absorción de la energía acústica en los contornos del recinto, personas y objetos situados en su interior.

El coeficiente de absorción acústica de un material es una magnitud adimensional que se define como la relación entre las energías acústicas absorbida (no reflejada) e incidente sobre él. Se escribe

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \qquad [8.1]$$

α es el coeficiente de absorción acústica; E_a y E_i, son las energías acústicas absorbida e incidente respectivamente.

Observada desde el interior del recinto, la energía acústica absorbida es la suma de la energía disipada en sus contornos, personas y mobiliario y la energía que se transmite al exterior.

De la anterior definición del coeficiente de absorción acústica surgen varias posibles formas de cuantificarlo, pues la fracción de energía incidente absorbida en una superficie depende del ángulo de incidencia. De entre todas ellas se pueden destacar por su importancia teórica y en las aplicaciones los siguientes coeficientes de absorción acústica:

Coeficiente de absorción acústica estadístico o aleatorio, α_{ran}

Se define, para una superficie plana de extensión infinita, como la relación entre las energías acústicas absorbida e incidente en la superficie, cuando el campo acústico incidente es perfectamente difuso, es decir el ángulo de incidencia varía constantemente de forma aleatoria. El máximo valor teórico de este coeficiente de absorción para una superficie plana es $\alpha_{ran} \cong 0{,}96$, (Morse&Ingard).

Coeficiente de absorción acústica en cámara reverberante o coeficiente de absorción sonora de Sabine, α_S

Este coeficiente está relacionado con la reverberación acústica en el recinto. La mayoría de los coeficientes de absorción que se publican se obtienen mediante el método de la cámara reverberante. Los fabricantes de productos absorbentes acústicos suelen dar el coeficiente de absorción de Sabine en seis bandas de octava con frecuencias centradas en 125, 250, 500, 1.000, 2.000 y 4.000 Hz. El coeficiente de absorción de Sabine es superior al coeficiente de absorción aleatorio, en algunas bandas de frecuencia se obtienen valores superiores a la unidad. Esta diferencia se debe al fenómeno de la difracción del campo acústico incidente sobre el material de la muestra y a que el campo acústico en el recinto no es totalmente difuso.

Se denomina *coeficiente de reducción del ruido* de un producto absorbente acústico **(NRC),** al número que se obtiene como valor medio de sus coeficientes de absorción sonora en las bandas de octava centradas en las frecuencias de 250, 500, 1.000 y 2.000 Hz. Expresándole como el múltiplo más próximo de 0,05.

Coeficiente de absorción acústica a ondas planas e incidencia perpendicular α_n

Este coeficiente está relacionado directamente con la impedancia acústica característica del material y su valor se determina mediante el método del tubo de impedancia.

Para materiales denominados de reacción localizada, y bajo ciertas condiciones de montaje, el coeficiente de Sabine y el de incidencia normal se pueden correlacionar.

8.3.2.- *La absorción acústica en un recinto*

La absorción acústica de una superficie de área S se obtiene multiplicando su coeficiente de absorción acústica por su área. Conocidos los coeficientes de absorción α_i de las diferentes superficies interiores de área S_i, la absorción acústica total debida a las superficies se obtiene mediante la expresión

$$A_{superficies} = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i . S_i \quad ,\mathrm{m}^2 \qquad [8.2]$$

El símbolo sumatorio está extendido a todas las superficies interiores de coeficiente de absorción diferente. La absorción acústica total se mide en m^2, al ser el coeficiente de absorción una magnitud adimensional, también se suele llamar Sabines métricos. En unidades anglosajonas la absorción se suele expresar en Sabines.

Se define como coeficiente de absorción acústica medio de un recinto, $\overline{\alpha}$, al cociente entre la absorción sonora total y el área total del recinto.

La absorción acústica total en un recinto es la suma de las absorciones acústicas debidas a las superficies interiores, $A_{superficie}$; mobiliario, $A_{mobiliario}$; aire, A_{aire} y personas situadas en su interior, $A_{personas}$.

$$A = A_{superficies} + A_{mobiliario} + A_{aire} + A_{personas} \qquad [8.3]$$

Los objetos unitarios, tales como personas, butacas, absorbentes especiales, etc, no pueden considerarse como superficies planas, y para caracterizar su absorción acústica se utiliza el concepto de *área de absorción acústica equivalente*, es el área imaginaria de un absorbente acústico, que con un coeficiente de absorción acústico unidad, produce la misma absorción acústica total.

Absorción acústica del aire en un recinto.

Al propagarse la perturbación acústica en el interior del recinto, la densidad de la energía acústica disminuye debido a procesos viscoelásticos de degradación y moleculares de relajación, que afectan de igual forma en todos los puntos del volumen del recinto.

En las frecuencias de interés en la acústica de recintos, la cantidad de sonido absorbido por el aire no es grande en recintos de pequeñas dimensiones. En los de grandes dimensiones, la absorción del aire puede ser importante a frecuencias superiores a 2.000 Hz. La absorción acústica del aire en un recinto se obtiene mediante la expresión

$$A_{aire} = 4mV \quad m^2 \qquad [8.4]$$

Donde m es el coeficiente de atenuación por metro y V es el volumen de la sala. En la Tabla 8.1 se indican algunos valores del coeficiente de atenuación m multiplicado por cuatro, a la presión de una atmósfera, temperatura de 20ºC y varios valores de la humedad relativa.

Humedad relativa	Frecuencia del centro de banda de octava, Hz		
	1000	2000	4000
50 %	0.0042	0.0089	0.0262
60 %	0.0044	0.0085	0.0234
70 %	0.0045	0.0081	0.0208

Tabla 8.1. Coeficiente de atenuación del aire 4m, a 20ºC y presión atmosférica normal (Unidad en el SI, m^{-1})

Absorción acústica de las personas en un recinto

La absorción acústica de un recinto ocupado por personas es debida principalmente al tipo de ropa. Si esta no es muy gruesa, la absorción acústica es únicamente considerable a medias y altas frecuencias. Como el tipo de vestido depende de la persona, estación del año y modas, los valores proporcionados por los diferentes autores pueden a veces diferir de forma apreciable. Por otra parte, la absorción acústica de una zona de audiencia depende también del tipo de asientos, su colocación y densidad de ocupación.

En recintos tales como aulas, bibliotecas, iglesias, teatros, auditorios, etc, la absorción acústica debida a las personas situadas en su interior representa la mayor contribución a la absorción acústica en el recinto.

Un método para calcular la absorción acústica de la audiencia consiste colocar asientos y/o personas en un recinto reverberante y calcular su absorción a partir de la variación del tiempo de reverberación del recinto, algunos datos se muestran en la tabla 8.2. Una vez conocida el área de absorción acústica equivalente de una persona en una determinada situación, se multiplica por el número de personas previstas en el recinto.

Mediciones realizadas en cámara reverberante						
Frecuencia, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Audiencia sentada sobre asientos de madera, dos personas por m^2	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87
Audiencia sentada sobre asientos de madera, una persona por m^2	0,16	0,24	0,56	0,69	0,81	0,78
Audiencia sentada sobre butacas medianamente tapizadas, 0,85m x 0,63 m	0,72	0,82	0,91	0,93	0,94	0.87
Butacas medianamente tapizadas, **no** ocupadas 0,85m x 0,63 m	0,44	0,56	0,67	0,74	0,83	0,87

Tabla 8.2: Coeficientes de absorción acústica equivalente de audiencia y asientos medidos en cámara reverberante.

Otro método consiste en utilizar el recinto (sala de concierto, teatro, etc) y medir su tiempo de reverberación con la sala vacía y ocupada, a partir de la diferencia de los tiempos de reverberación se obtiene la absorción acústica de la audiencia o de las butacas.

SALAS NO OCUPADAS Coeficientes de absorción acústica equivalente de las butacas						
Frecuencia, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Butacas muy tapizadas	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Butacas medianamente tapizadas	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
Butacas poco tapizadas	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55
SALAS CON AUDIENCIA Y ORQUESTA Coeficientes de absorción acústica equivalente de la audiencia						
Frecuencia, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Butacas muy tapizadas	0,76	0,83	0,88	0,91	0,91	0,89
Butacas medianamente tapizadas	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86
Butacas poco tapizadas	0,56	0,68	0,79	0,83	0,86	0,86

Tabla 8.3. Coeficientes de absorción acústica equivalente en grandes recintos.

En recintos grandes, según resultados obtenidos por Beranek y Kosten, cuando sobre una superficie se coloca un gran número de personas, en ese recinto hay una superficie muy absorbente, y la absorción acústica debida al público no se obtiene multiplicando el área de absorción acústica equivalente de una persona por el número de personas, sino que se aproxima más a la realidad el multiplicar el "área acústica del recinto" por unos coeficientes de absorción acústica equivalentes obtenidos experimentalmente. La Tabla 8.3 muestra los resultados obtenidos por Beranek.

El efecto del tapizado de las butacas es aumentar la absorción acústica a bajas frecuencias. A partir de la banda de octava de frecuencia central de 1000 Hz, no hay una diferencia importante entre la absorción de una audiencia sentada sobre butacas tapizadas o no.

9.- FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA GEOMÉTRICA

9.1.- INTRODUCCIÓN

La Acústica Geométrica considera que la propagación del sonido se realiza en línea recta entre el emisor y el receptor, en ausencia de obstáculos. El estudio se realiza mediante el trazado de rayos sonoros, éstos son unas líneas imaginarias perpendiculares a los frentes de onda, y cumplen las mismas leyes físicas que la óptica geométrica.

Para los proyectistas la teoría geométrica es muy útil, pues describe de forma sencilla, aspectos parciales del campo sonoro en un recinto. Es de gran utilidad para un primer estudio general y permite obtener aproximadamente la forma geométrica más adecuada para conseguir un reparto regular de la energía sonora en el recinto, previsión de zonas del mismo en la que puedan existir ecos, focalizaciones, zonas de silencio, etc. También permite determinar el emplazamiento correcto de las superficies reflectoras, que permiten reforzar el nivel sonoro en determinadas zonas con un tiempo de retardo adecuado.

Por otra parte, los sistemas de simulación de la acústica de un recinto mediante el uso de ordenadores utilizan los procedimientos de la acústica geométrica. Estudian el campo acústico en un recinto utilizando la respuesta impulsiva. Este procedimiento de simulación se ha impuesto en los últimos años, al mejorar los métodos de cálculo y su rapidez. El número de programas de simulación disponibles cada vez es mayor. Para su adecuada utilización es necesario tener buenos conocimientos de acústica.

Algunas limitaciones de la aplicación del método geométrico son las siguientes:

- La longitud de las ondas acústicas debe ser mucho menor que las dimensiones del recinto y los objetos que hay en su interior. La mayor concordancia entre las predicciones y los resultados experimentales se da a altas frecuencias. En bajas frecuencias hay que considerar los fenómenos de difracción.
- La diferencia de impedancia entre el aire y los cerramientos del recinto, debe ser grande para que se produzcan las reflexiones de las ondas acústicas.
- Las dimensiones de los relieves en los paramentos del recinto deben ser mucho menores que la longitud de las ondas, en caso contrario el sonido reflejado lo haría de forma difusa.

En la práctica se encuentra el siguiente comportamiento de las ondas acústicas al encontrarse en su propagación un obstáculo:

- A frecuencias bajas se difractan alrededor de la mayoría de los obstáculos, pero de forma sorprendente se reflejan de manera especular sobre una superficie con rugosidades.
- En frecuencias altas se producen sombras acústicas al no poder bordear los obstáculos, y se reflejan de forma difusa en las superficies rugosas. Esto es fácil de comprobar colocándose detrás de un obstáculo, el sonido parece más grave al no oírse las componentes de alta frecuencia.

A la frecuencia de 500 Hz, la mayoría de los objetos usuales para los seres humanos producen reflexiones difusas. A frecuencias superiores a 2 kHz se producen sombras

acústicas y a partir de 8 kHz, cada parte de un objeto refleja el sonido de forma especular.

9.2.- TRAZADO DE LOS RAYOS REFLEJADOS

9.2.1 *Reflexiones por paredes planas*

La teoría geométrica de la propagación del sonido considera que el sonido se propaga en línea recta. Cuando se encuentra un obstáculo en su camino, parte de la energía acústica es absorbida por el obstáculo y el resto es reflejada. Si la superficie del obstáculo es lisa, el rayo incidente se refleja en una sola dirección, *reflexión especular*, siguiendo las leyes de Snell, y si la superficie es rugosa, el rayo reflejado lo hace en todas las direcciones, según la ley de Lambert, *reflexión difusa.*

El modelo de acústica geométrica es útil para predecir las llegadas de las reflexiones tempranas que llegan al receptor, y utiliza dos métodos.

1) Método del *trazado de rayos:* desde una fuente se proyectan rayos múltiples, estos se proyectan en las superficies interiores del recinto hasta que inciden sobre el receptor.
2) Método de las *fuentes imagen*, las reflexiónes de los rayos producidos en la fuente, se obtienen mediante la construcción de otra fuente imagen, ésta es la imagen especular respecto al plano de la superficie reflectora. Esta propiedad nos permite sustituir cada superficie plana por la imagen, que de la fuente se obtiene por dicho plano. En los cálculos se tiene en cuenta la absorción de la superficie plana.

Los dos métodos tienen sus ventajas e inconvenientes. Para predecir las reflexiones tempranas y los ecos, el método de las fuentes imagen es el más apropiado. Se puede utilizar estadísticamente el método del trazado de rayos para obtener expresiones para el número de reflexiones, su densidad, y parámetros acústicos como el tiempo de reverberación de un recinto, el nivel de presión sonora del campo reverberante, distancia crítica, etc.

Los rayos reflejados en el caso de superficies planas, se trazan de la siguiente forma, figura 9.1:

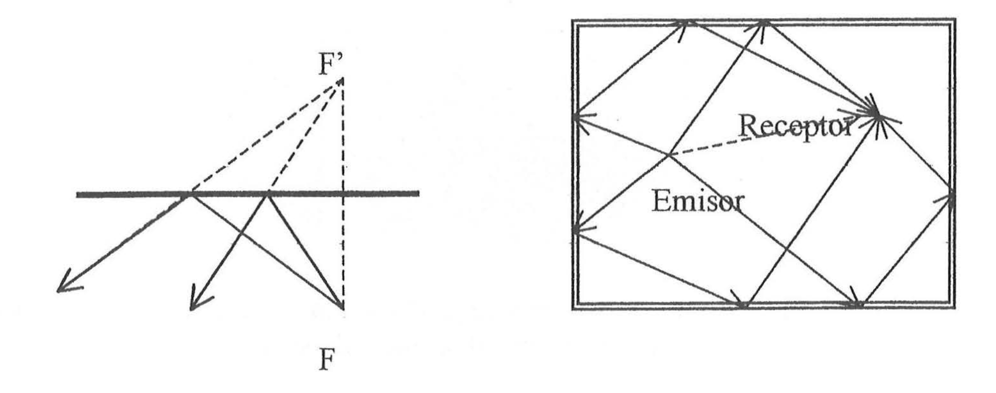


Figura 9.1: Trazado de los rayos reflejados.

En la figura 9.2 se puede visualizar la construcción de fuentes imaginarias. Las fuentes imágenes debidas a una primera reflexión se llaman de primer orden, a las debidas a la segunda reflexión de segundo orden, y así sucesivamente. El número de reflexiones de orden n se obtiene mediante la expresión: $S_n = 4n^2 + 2$

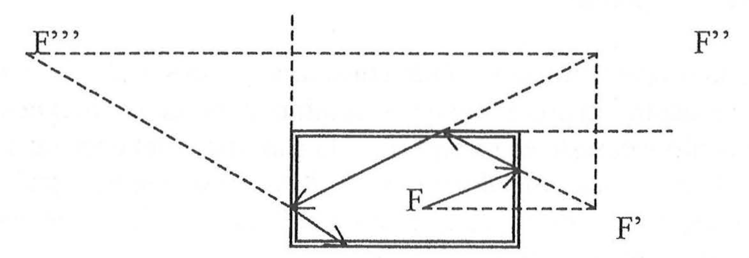


Figura 9.2: Construcción de fuentes imaginarias.

En la figura 9.3 se comparan los resultados de las reflexiones de primer y segundo orden en tres formas diferentes de planta de la sala: rectangular, abanico y abanico invertido. Los resultados se han obtenido utilizando un programa de simulación basado en algoritmos de trazado de rayos.

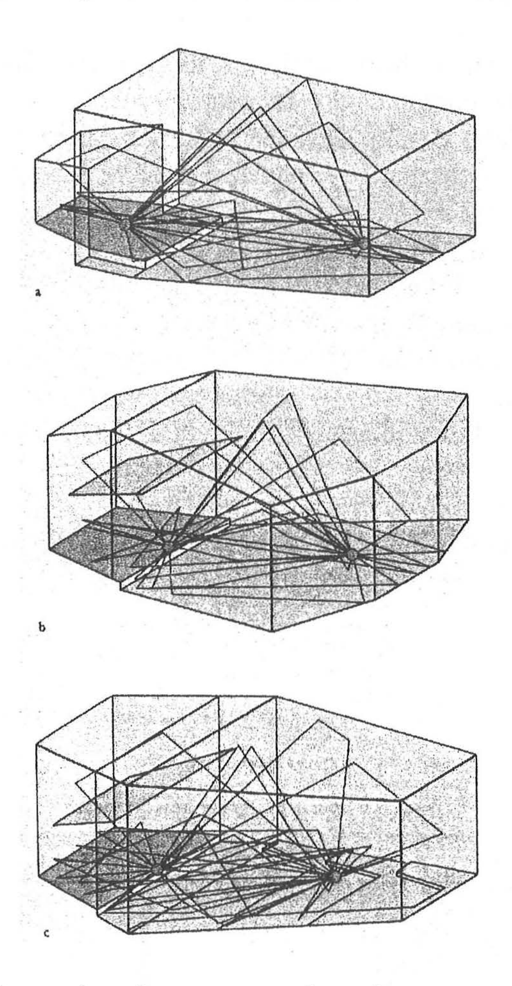


Figura 9.3: Reflexiones de primer y segundo orden en un punto de recepción, en tres formas diferentes de sala.

9.2.2 *Reflexiones por superficies curvas*

En el caso de superficies curvas, las reflexiones sonoras sobre ellas, se representan considerando en cada punto la superficie tangente a la misma. A continuación, estudiamos algunos casos de superficies cóncavas, se representa una sección de alguna de ellas. A altas frecuencias se puede hacer uso de todas las propiedades geométricas que presentan las cónicas y cuádricas.

Superficie cilíndrica circular

Si la fuente sonora está en la superficie o muy próxima a ella, los rayos sonoros se reflejan sucesivamente sobre los puntos de la superficie, y aquellos que coinciden con los de los polígonos regulares inscritos en la circunferencia, vuelven otra vez a la fuente. Esto explica los fenómenos que se producen en recintos con paredes cilíndricas o esféricas, en las que al emitir un sonido muy cerca de la superficie se puede percibir en puntos muy distantes del emisor, mientras que en centro del recinto no se percibe. El fenómeno es más pronunciado a altas frecuencias. Este hecho es muy conocido en la galería anular de ecos de la catedral de San Pablo de Londres.

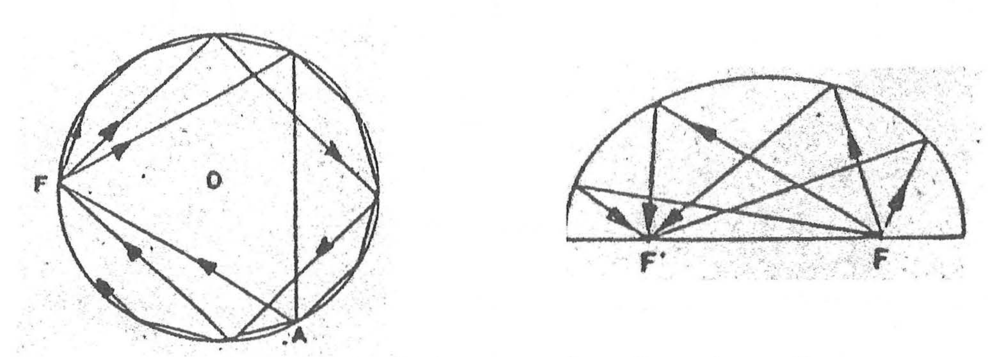


Figura 9.4: Reflexiones en circunferencias y elipses

En el caso de *secciones elípticas* los sonidos emitidos se concentran en los focos.
En las *secciones parabólicas*, todos los rayos que inciden sobre la sección, paralelos al eje, se reflejan en el foco, y viceversa.

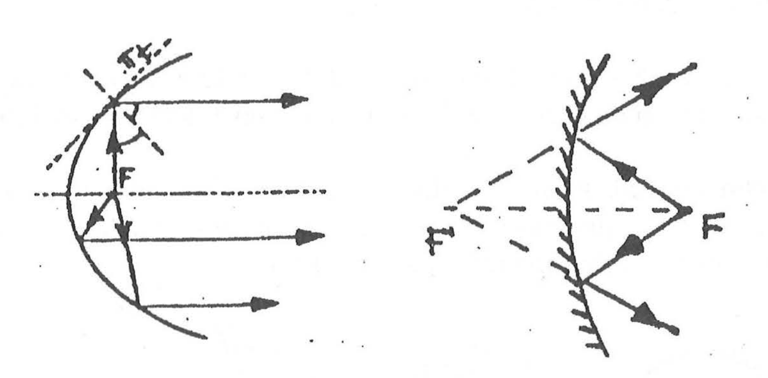


Figura 9.5: Reflexiones por parábolas e hipérbolas.

Las *secciones hiperbólicas* producen la divergencia de los rayos acústicos. Son más recomendables que las secciones parabólicas como reflectoras de la zona posterior del recinto, en el caso que la anchura de la zona de audiencia sea mayor que la longitud de la curva reflectante.

Superficies convexas

Las superficies convexas producen la dispersión del sonido, produciendo una distribución más homogénea del sonido en el recinto.

Techos abovedados

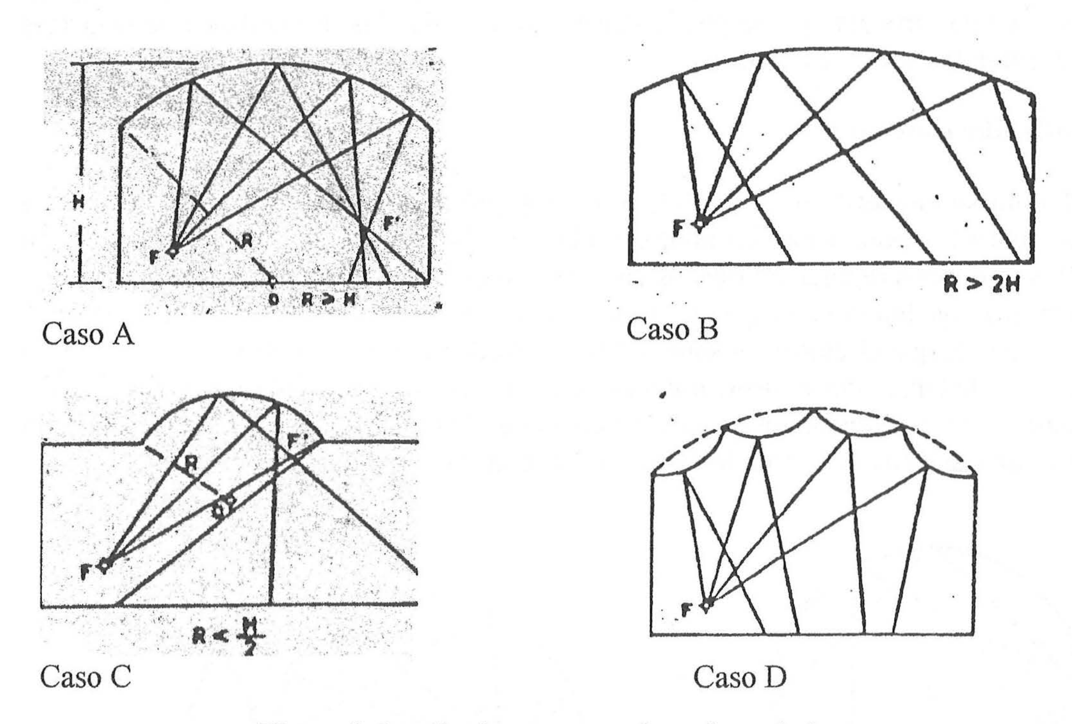


Figura 9.6: reflexiones por techos abovedados.

Los techos abovedados concentran el sonido reflejado. Analicemos los siguientes casos:

Caso A: El radio de la bóveda es del orden de la altura, en este caso se producirán focalizaciones sobre la zona de la audiencia, disminuyendo la inteligibilidad de los mensajes sonoros.

Caso B: El radio de la bóveda es mayor que el doble de la altura. El sonido reflejado se distribuye uniformemente sobre la zona de la audiencia.

Caso C: El radio de la bóveda es menor que la mitad de la altura. La concentración del sonido se produce por encima de la zona de la audiencia y no afecta a la inteligibilidad.

Caso D: En un techo abovedado si se colocan figuras policilíndricas el sonido se difundirá mejor. En muchas situaciones las bóvedas deben ser tratadas acústicamente mediante absorción, difusión o transmisión, véase la figura 9.7.

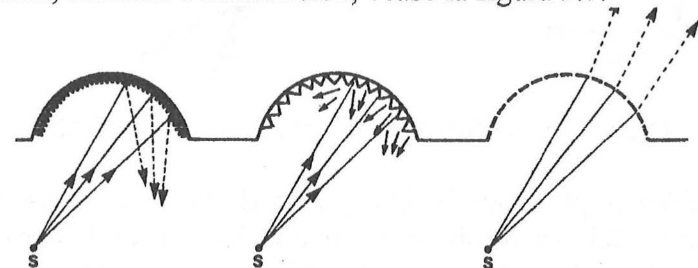


Figura 9.7: Tratamiento local de una superficie que concentra el sonido.

9.3.- ECOS

Un eco es una señal sonora repetida que parece venir de un lugar diferente al de la fuente emisora. Son reflexiones del sonido que se perciben como sucesos psicoacústicos distintos. Los ecos molestan y producen una acústica desfavorable en un recinto. Reducen la inteligibilidad de la palabra. Si la señal es música esta se percibe poco clara, aunque el oído humano es mucho menos sensible a los retardos de la música. Los ecos pueden ser naturales y artificiales.

Los experimentos muestran que el sistema auditivo humano tiene un intervalo tiempo de respuesta medio para poder percibir dos perturbaciones sonoras de forma separada, (fenómeno de fusión). Para la *palabra*, impulsos cortos, el tiempo de respuesta medio es de 50 ms, es decir dos señales acústicas que llegan en un intervalo de tiempo inferior a 50 ms, se perciben como una única señal. Para sonidos musicales, impulsos más prolongados, el tiempo de respuesta medio es de 100 ms.

Para que una reflexión sonora pueda percibirse como un eco deben cumplirse los siguientes requisitos:

1) Tiene que haber un retardo de tiempo suficiente entre la llegada del sonido directo y el reflejado que produce el eco.
2) El sonido reflejado debe tener el suficiente nivel de presión sonora.
3) El sonido reflejado causante del eco debe estar lo suficientemente aislado de otras reflexiones.

Con la palabra se necesita un tiempo de retardo de aproximadamente 100 ms para un eco audible. Cuando el nivel del sonido reflejado está 10 dB por debajo del nivel del sonido directo, no se perciben como ecos.

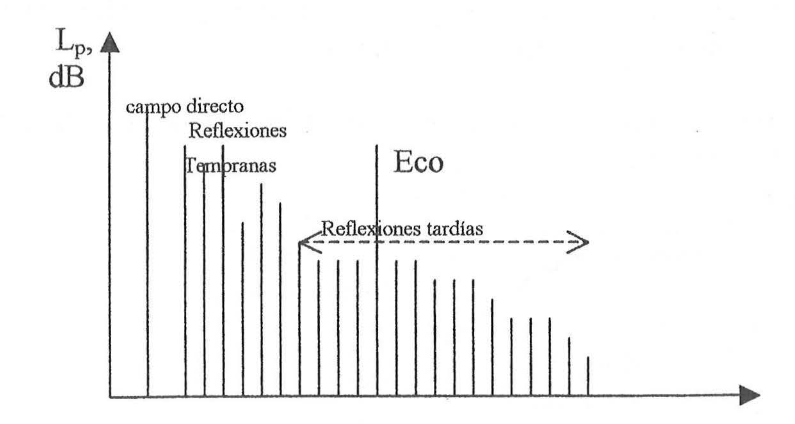


Figura 9.8: Esquema de las llegadas de las ondas acústicas a un punto de un recinto.

Experimentos realizados en 1950 por Haas, determinaron la relación entre el porcentaje de oyentes molestados por mensajes orales retardados. En la figura 9.9 los números que aparecen al lado de las curvas son la diferencia de niveles entre el sonido reflejado y el directo. La palabra era emitida a un ritmo de 5,3 sílabas por segundo.

En un trabajo posterior realizado por Bolt y Doak, figura 9.10, estos ampliaron las curvas de molestia de reflexiones, mostrando de forma aproximada la respuesta del oído humano a los ecos.

Porcentaje
de oyentes
molestados

100
80
60
40
20
+10
0
-3
-6
-10
0 40 80 120 160

Figura 9.9: Intervalo de tiempo entre el sonido directo y el reflejado, en ms.

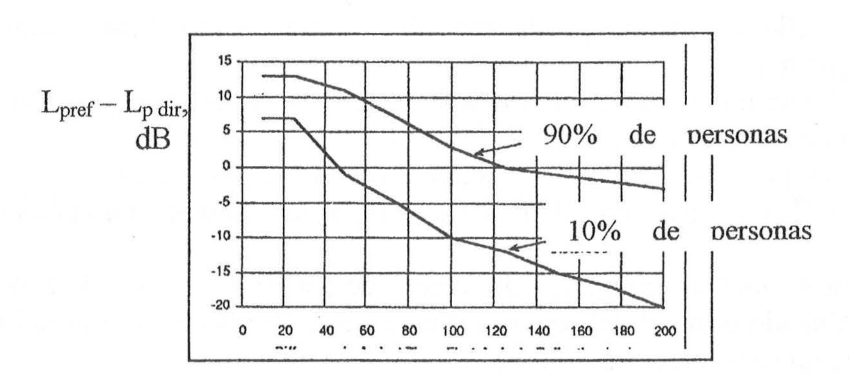


Figura 9.10: Porcentaje de oyentes a los que les molesta una reflexión única de nivel y tiempo de retardo variables.

En la figura 9.11 se muestran las zonas de integración, (debajo de la curva) y la zona de ecos,(zona superior de la curva).

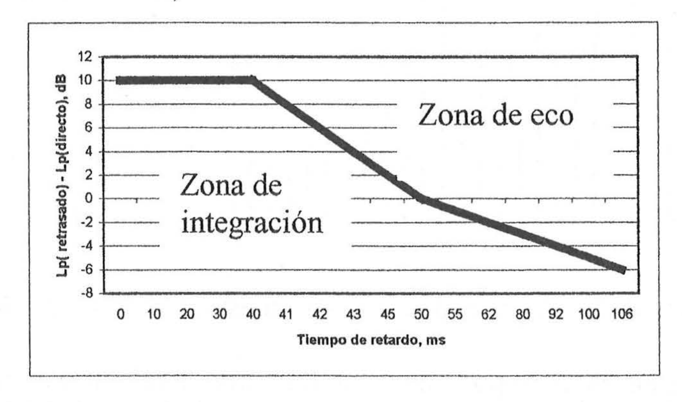


Figura 9.11: Zonas de integración y de ecos para sonidos retrasados.

Dentro de un recinto, las paredes que producen ecos, son menos absorbentes acústicas que las demás, o bien cóncavas para que reflejen el sonido con el suficiente nivel de presión acústica.

En un recinto, se pueden producir ecos aislados por las reflexiones procedentes de la pared posterior, y de forma especial con el rincón superior, figura 9.12, cuando forma un ángulo recto la pared posterior y el techo. Esta reflexión de segundo orden es particularmente molesta, si la pared posterior sigue la curva de las filas de los asientos y concentra el eco en una determinada zona de la audiencia, figura 9.13. Por ejemplo, en una sala multiuso con planta semicircular, y donde la pared posterior sigue la misma forma, las reflexiones tardías se concentran sobre el escenario.

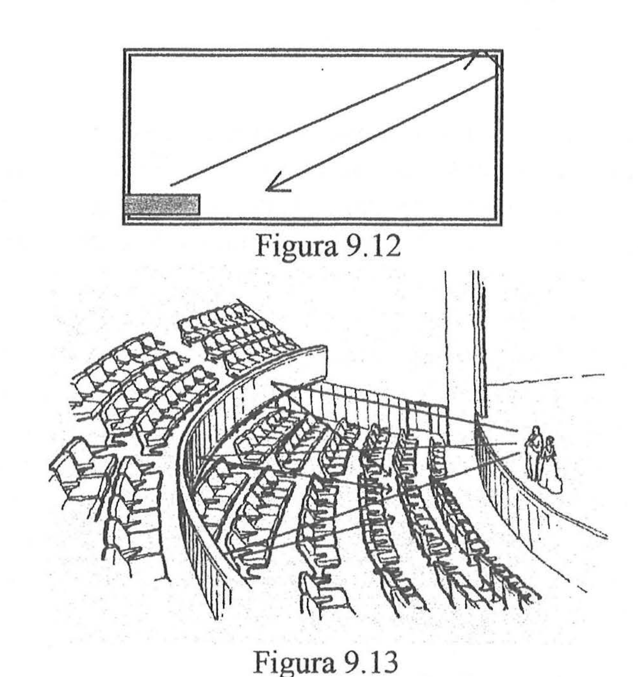
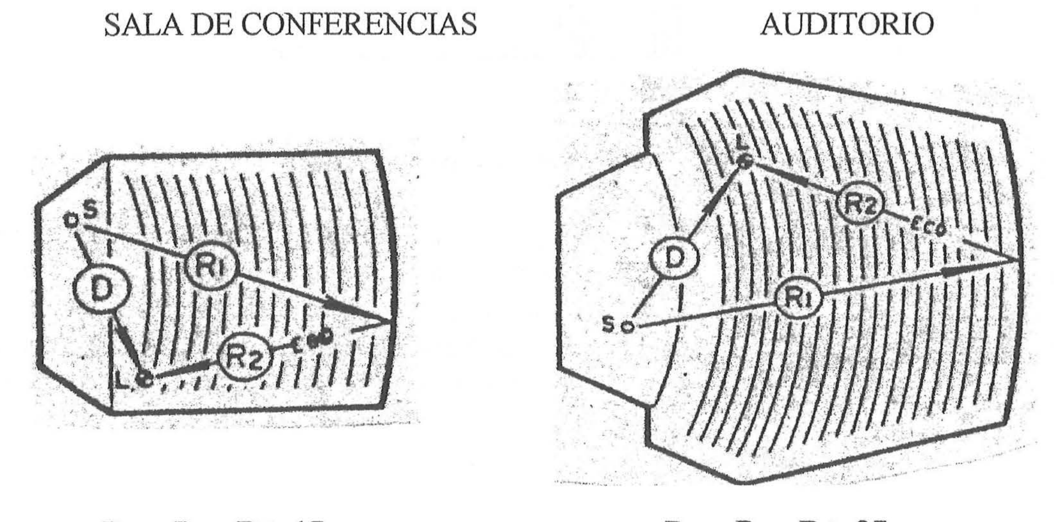


Figura 9.12

Figura 9.13

Generalmente las reflexiones procedentes del techo de un recinto, no tienen suficiente tiempo de retardo como para producir ecos. En la figura 9.14 se muestran las diferencias de camino entre el sonido reflejado y el directo en un recinto para que no se produzcan ecos. Se han tomado valores conservadores, para la palabra 50 ms y para la música 80 ms.

SALA DE CONFERENCIAS AUDITORIO



$R_1 + R_2 - D \geq 17$ m $R_1 + R_2 - D \geq 27$ m

Figura 9.14: Diferencia de camino recorrido entre el sonido directo y el reflejado entre la fuente sonora y el receptor.

La eliminación de un eco molesto se puede realizar mediante varios procedimientos, por ejemplo mediante un tratamiento absorbente sonoro o difusor del elemento que lo produce, o bien, acompañando a ésta reflexión de otras muchas que la oculten.

Cuando las reflexiones están producidas por una superficie plana, se puede determinar fácilmente las zonas del recinto donde se puede producir la sensación de eco. Se comprueba que es la zona interior a una hipérbola límite.

Eco fluctuante (Flutter echo).

Cuando una fuente sonora emite entre dos superficies planas paralelas reflectantes, el sonido se reflejará repetidas veces hasta que se vuelva inaudible. Las ondas reflejadas se superpondrán originando una onda estacionaria. Este eco fluctuante o pulsatorio no es por tanto un eco verdadero, en el sentido que la diferencia de camino recorrido entre el sonido directo y el reflejado supere una cierta distancia.

En un recinto con dos paredes paralelas separadas una distancia D metros, se da una palmada, figura 9.15. Cada intervalo de tiempo 2D/c segundos, (c es la velocidad del sonido en el aire), las ondas se vuelven a superponer en ese punto. Por ejemplo si la distancia entre las paredes es 15 m, aproximadamente cada 88 ms se superponen en ese punto los dos sonidos, según el efecto Haas se producirá un eco. Si la distancia entre las paredes fuese de 5 m, se superpondrían cada 29 ms, que de acuerdo con el efecto Haas no se percibiría como un eco. Sin embargo, la pulsación es oída debido a que nuestro oído es muy sensible a repeticiones periódicas del sonido.

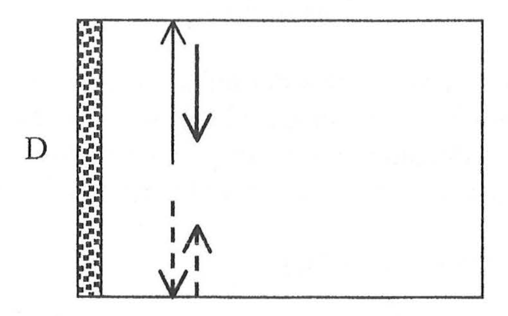


Figura 9.15: Ejemplo de eco fluctuante inducido por dos paredes paralelas reflectoras.

El eco fluctuante es un defecto acústico que se debe evitar en los recintos. Afecta a la inteligibilidad de la palabra y origina coloración tonal de la música. Se puede eliminar el eco fluctuante eliminando el paralelismo de las superficies reflectoras, tratando una de las paredes con absorción acústica, o a una o ambas paredes con difusores acústicos. En la figura 9.16 se muestran ejemplos de formas geométricas que pueden producir ecos fluctuantes.

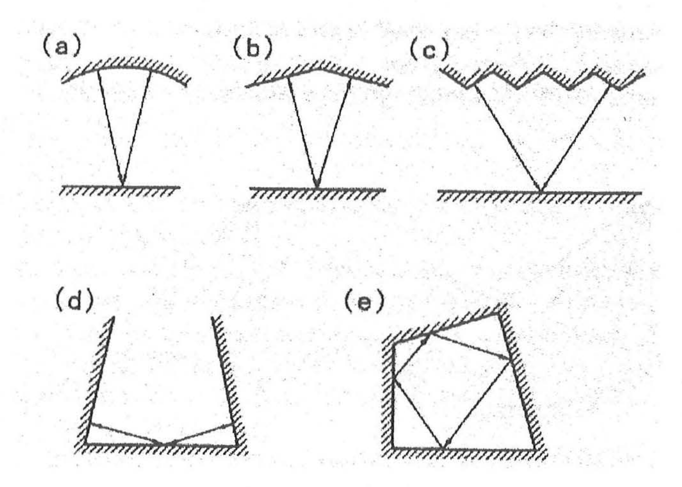


Figura 9.16: Formas geométricas que pueden producir eco fluctuante o de aleteo.

Ecos artificiales

No son consecuencia de la acústica del local, pues la sensación de eco no depende necesariamente de la presencia de un sonido reflejado. Con el sistema de refuerzo sonoro del recinto, la señal retardada, eco, puede provenir de un altavoz distante y llegar con retraso respecto a la señal de los altavoces próximos. Estos ecos artificiales son tan molestos como los naturales, pero con una instalación adecuada de los altavoces se pueden evitar.

En la práctica hay que tener en cuenta, que si los altavoces están sincronizados en directo con el orador, cada altavoz produce el mismo efecto que una pared reflectora situada a mitad de camino entre él y el orador original, siempre que la señal no esté muy amplificada. En consecuencia, el altavoz puede estar situado a una distancia de 17 m del orador sin riesgo de producir eco. Esta impresión de eco no es de esperar que ocurra hasta que la distancia entre el orador y el altavoz supere los 34 m.

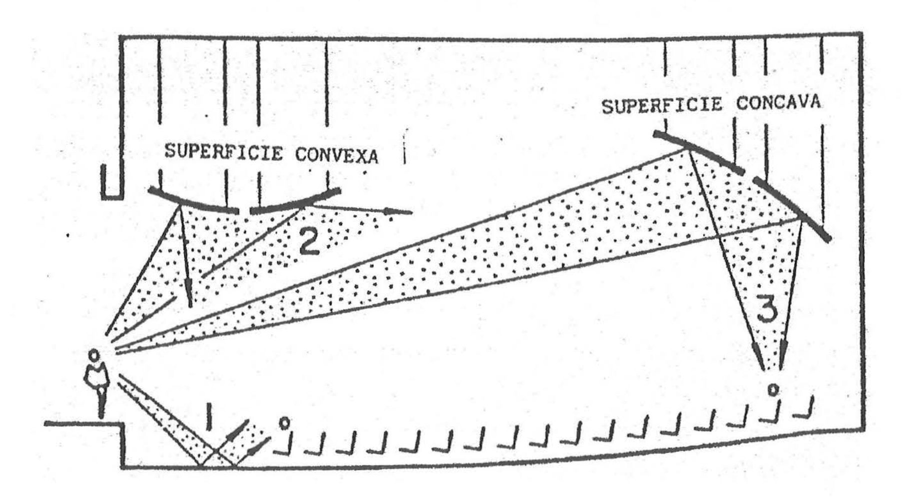
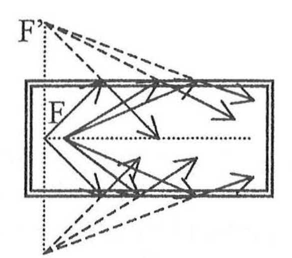


Figura 9.17: Reflexiones acústicas producidas por superficies de geometría diferente: 1) reflexión especular; 2) reflexión difusa; 3) reflexiones concentradas o focalizadas.

9.4.- REFLEXIONES DE LAS PAREDES LATERALES

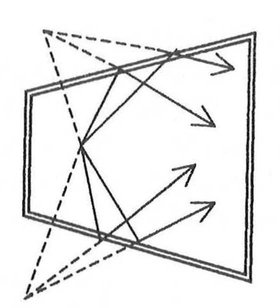
En un recinto, las paredes laterales son estructuras de apoyo y de carga, por lo que se diseñan teniendo en cuenta las exigencias estructurales. Para las primeras reflexiones únicamente es útil una pequeña banda de las paredes verticales laterales, comprendida aproximadamente por el plano que contiene a la fuente sonora y el que contiene a la audiencia. El sonido reflejado por estas paredes cruza el recinto con incidencia rasante sobre la audiencia, al igual que el sonido directo.

Está demostrado que las reflexiones tempranas, las que llegan al oyente dentro de 100 milisegundos después de la llegada del sonido directo, producidas por las paredes laterales aumentan la calidad acústica del recinto, proporcionando la sensación de espacio. En las figuras 9.18, 9.19 y 9.20 se muestran algunas aplicaciones del método de las fuentes imagen en algunos tipos de plantas de recintos.



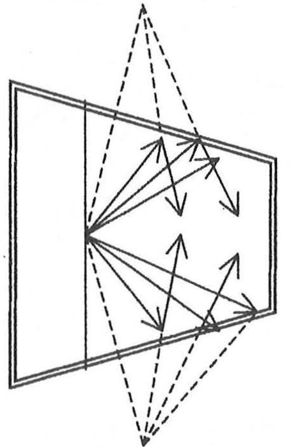
Cuando las paredes son paralelas, los rayos reflejados alcanzan a la mitad del recinto.

Figura 9.18: Reflexiones laterales en un recinto de planta rectangular.



Con paredes divergentes, los rayos sonoros se reflejan hacia el fondo del recinto.
No proporcionan reflexiones iniciales al centro del recinto.

Figura 9.19: Reflexiones laterales en un recinto con paredes divergentes



Con paredes convergentes los rayos reflejados se distribuyen más uniformemente en el recinto.

Figura 9.20: Reflexiones laterales en un recinto con paredes convergentes

Es habitual el diseñar recintos con paredes divergentes cuyas paredes laterales tienen forma de diente de sierra. Los que presentan mejor comportamiento acústico son los que tienen partes de las paredes, paralelas al eje longitudinal del recinto, aunque también presentan zonas de sombra acústica que no reciben reflexiones iniciales. La forma de evitar las sombras es construir las paredes paralelas al eje longitudinal, ligeramente convexas, de manera que dispersen las reflexiones laterales y lleguen a todos los puntos del recinto.

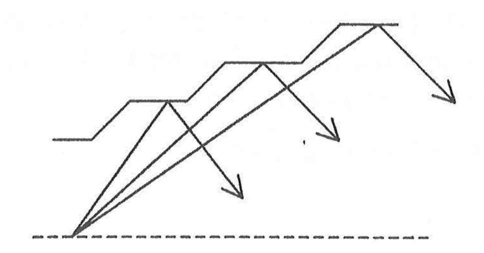
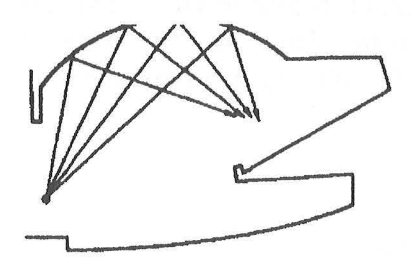
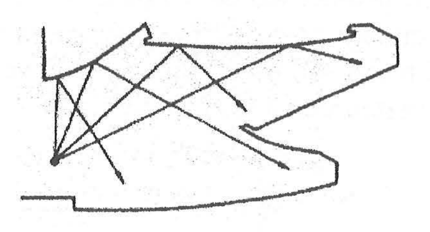


Figura 9.21: Reflexiones laterales en un recinto con paredes divergentes con forma de dientes de sierra.

9.5.- REFLEXIONES DEL TECHO

El sonido reflejado por el techo de una sala juega un papel importante en el refuerzo del sonido directo, y es muy importante para los oyentes de las últimas filas de asientos. Las formas cóncavas del techo distribuyen peor el sonido que las convexas, véase la figura 9.22.





Mala distribución del sonido
Buena distribución del sonido

Figura 9.22: Distribución del sonido por superficies cóncavas y convexas.

En una sala el techo es la mayor superficie reflectora y debe de ser tratada convenientemente para producir reflexiones útiles. Es un error, por desgracia habitual, el tratamiento absorbente de toda la superficie del techo de un recinto para reducir el tiempo de reverberación con la esperanza de mejorar la inteligibilidad de la palabra, y posteriormente tener que instalar sistemas de refuerzo sonoro.

Según Cremer (*Principles and Applications of Room Acoustics*, vol 1, pag 120), el sonido reflejado no se tiene en cuenta en un punto de la sala cuando su nivel es inferior al directo en al menos un 10%. Si consideramos que la intensidad del sonido a una distancia de una fuente es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa, la condición de no considerar el sonido reflejado, puede representarse por la siguiente desigualdad:

$$\frac{I}{I_d} = \frac{r^2}{(2h)^2 + r^2} \rangle 0{,}1 \Rightarrow h \langle \frac{3r}{2}$$

Para la palabra, el tiempo de retardo ha de ser inferior a 50 ms, (para la música puede ser 80 ms), esto implica que las diferencias entre los caminos recorridos entre el sonido reflejado y directo ha de ser menor de 17 m, en consecuencia:

$$\sqrt{(2h)^2 + r^2} - r \langle 17 \Rightarrow h \langle \sqrt{8{,}5(r+8)} \qquad [9.1]$$

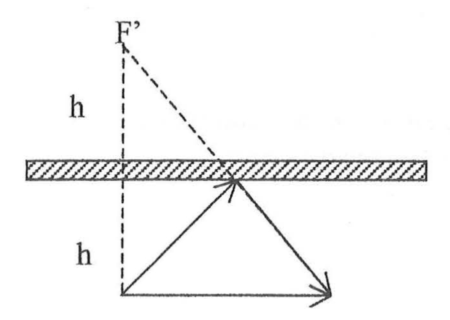


Figura 9.23: Altura del techo para que proporcione reflexiones útiles

La figura 9.24 muestra la limitación de la altura efectiva del techo de una sala en función de la distancia entre el emisor y el receptor. La línea **a** indica la intensidad del sonido reflejado por el techo que es un 10% de la intensidad del sonido directo, la curva **b** indica el lugar geométrico de los puntos cuya diferencia de recorrido entre el sonido reflejado y el directo es de 17 m, para alturas del techo por debajo de esta línea las reflexiones del techo son útiles para reforzar la palabra. Las alturas correspondientes a la zona rayada pertenecen a la zona crítica.

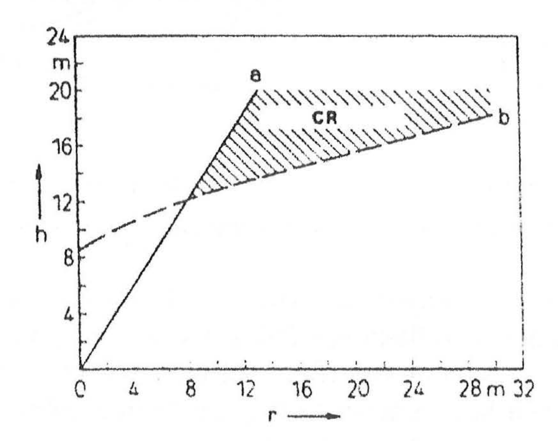


Figura 9.24: Limitaciones de la altura del techo en función de la distancia emisor-receptor

No se pueden esperar distorsiones para alturas inferiores a 12 m, punto en el que se cortan las curvas a y b, ni en las alturas de los techos por debajo de la curva b. Es posible evitar la zona crítica utilizando techos de pendiente inclinada ascendente hacia el fondo de la sala.

En la práctica, las alturas típicas de las salas de concierto que suministran una adecuada energía temprana son las siguientes:

Nº de asientos	Altura, m
500	9-11
1500	13,5- 16
2500	18-21

La máxima altura del techo puede calcularse de la expresión siguiente:

$$h = 0{,}85 \sqrt[3]{\frac{V}{T_{60}(500Hz)}} \qquad [9.2]$$

V es el volumen de la sala en m^3, y T_{60}(500 Hz) es el tiempo de reverberación previsto en esa sala en la banda de octava de 500 Hz.

Un techo horizontal proporciona una cantidad limitada de reflexiones con poco tiempo de retraso. La inclinación adecuada del techo, contribuye con más reflexiones útiles que mejoran la sonoridad en el recinto. La figura 9.25 muestra dos ejemplos de zonas en las que se producen reflexiones útiles.

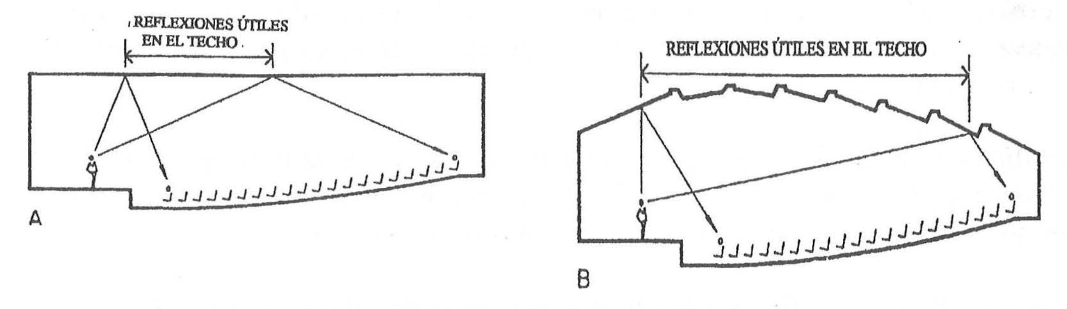


Figura 9.25: Reflexiones útiles del techo de un recinto

El tamaño de los reflectores planos debe ser al menos de 2,5 m, pero no demasiado grandes para que no produzcan coloración del sonido, desplazamiento aparente de la fuente sonora. Los paneles reflectores deben ser suficientemente pesados para suministrar buenas reflexiones y asegurar que sus frecuencias de resonancia están fuera del rango de la palabra.

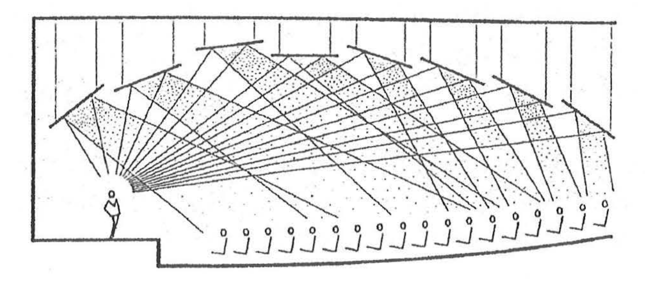
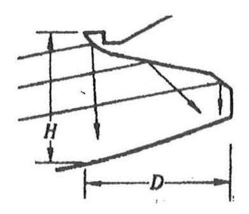


Figura 9.26: La adecuada colocación de reflectores en el techo mejora la distribución del sonido en el recinto.

Anfiteatros

Los anfiteatros aumentan el número de oyentes en la sala y disminuyen la distancia del escenario a los últimos asientos. La acústica debajo de los anfiteatros puede llegar a ser peor si el diseño no es el adecuado. El sonido es atenuado debido al espacio que recorre por encima de la audiencia y a que las reflexiones útiles procedentes del techo y paredes son menores.



Para mejorar la acústica debajo de los anfiteatros, la profundidad D debe ser la menor posible y menos de dos veces la altura de la apertura debajo del anfiteatro.

$D < 2H$.

9.6.- LA AUDICIÓN Y LA VISIÓN

La reducción de la distancia entre el orador y el oyente no es únicamente importante por motivos acústicos sino también por motivos visuales. El oyente verá mejor al orador si está más próximo a él. De hecho, una buena acústica de un recinto está relacionada íntimamente con una buena visión del orador, generalmente si se puede ver bien al orador, se le puede oír bien.

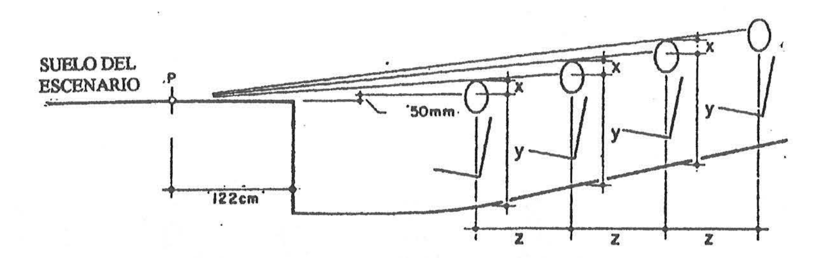
La inteligibilidad de la palabra, no depende únicamente del nivel de presión con el que percibe el oyente el sonido. También depende de cómo puede ver las expresiones faciales, gestos, movimientos del cuerpo, de los labios del orador, etc.

Para una persona media, es difícil ver las expresiones faciales a distancia mayores de 12 m, gestos a 20 m y movimientos de cuerpos grandes a 30 m. Por las mismas razones, una buena iluminación también ayuda a la inteligibilidad de la palabra.

El suelo de un recinto

El suelo de un recinto con asientos tiene una gran absorción acústica. El sonido directo es rápidamente atenuado por la absorción acústica de la audiencia y los asientos. Cuando el sonido se emite de manera rasante tiene lugar una absorción acústica importante en las frecuencias comprendidas entre 100 y 300 Hz, (grazing incidence).

Para mejorar la visión en la sala y la acústica se aumenta la pendiente del suelo, de esta forma se mejora la llegada del sonido directo sobre la audiencia. Un procedimiento para establecer una buena línea de visión es el siguiente, figura 9.27.



X: máximo 125 mm, Y: máximo 112 cm,
Z, espacio entre filas; P, punto de llegada de la visión.
Figura 9.27: Línea de visión

La realización de un suelo con pendiente produce beneficios visuales y acústicos. Si además el orador está sobre un escenario o estrado, se optimiza la llegada de energía acústica directa sobre la zona de audiencia. Figura 9.28.

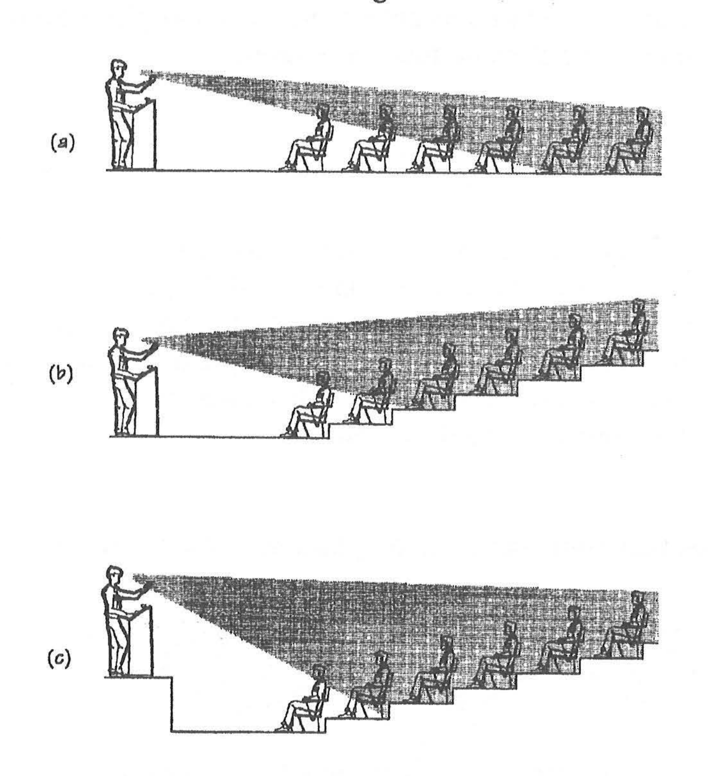


Figura 9.28: Sonido directo orador-oyentes en situaciones diferentes.

El suelo plano horizontal y las líneas de visión.

Cuando el suelo del recinto es plano y horizontal, el sonido se desplaza sobre la audiencia con un pequeño ángulo de incidencia y absorbe más energía acústica a bajas frecuencias. En recintos pequeños, tales como las aulas de centros escolares, es habitual que el suelo sea plano y no exista un estrado para el orador. En este tipo de recintos es muy importante determinar las líneas de visión de la zona de audiencia. La línea de visión es el segmento rectilíneo que une el ojo de la persona sentada y el punto foco. El punto foco es el punto más bajo en la zona donde esta el orador, pizarra, pantalla, etc,

que debe ser visible por cada persona de la audiencia. No hay obstrucción visual de la persona situada delante.

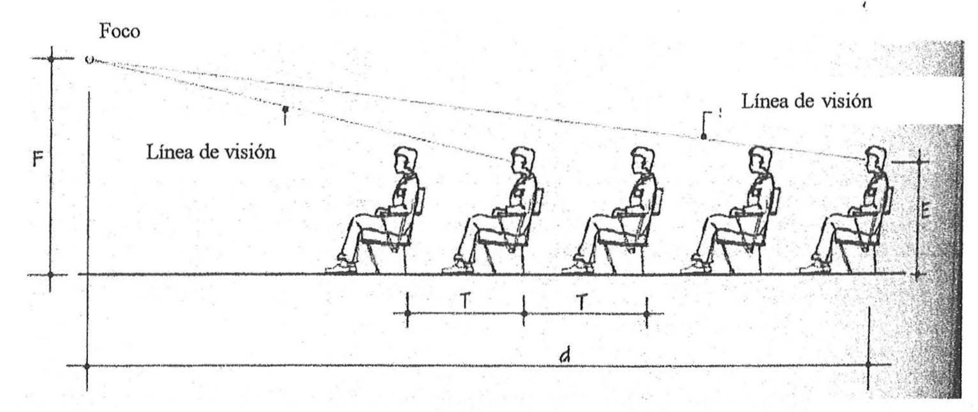


Figura 9.29: La visión sobre un suelo plano horizontal.

La máxima distancia desde el último asiento sobre un suelo plano horizontal al plano vertical al mismo que contiene al punto foco, se expresa

$$d = \frac{T}{c}(F - E) \quad m \qquad [9.3]$$

donde

c, es la distancia entre la parte superior de la cabeza y el ojo, c = 0,1 m.
d, la distancia entre el último asiento y la vertical del punto foco.
E, altura del ojo sobre el nivel del suelo, habitualmente E = 1,1 m.
H, altura del foco sobre el nivel del suelo. Es el punto más bajo sobre el suelo, o el escenario que se necesita sea visible por la audiencia.
T, es la distancia entre las filas de asientos.

Si los asientos de dos filas contiguas están desplazados entre sí, entonces c = 0,05 cm.

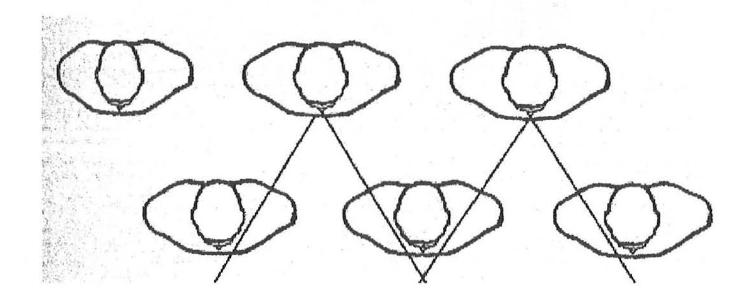


Figura 9.30: El desplazamiento de dos filas continuas de asientos mejora la visión

Existen criterios de inteligibilidad de la palabra, en donde si el oyente puede ver los labios del orador, ver su expresión facial y gestos, la inteligibilidad efectiva aumenta.

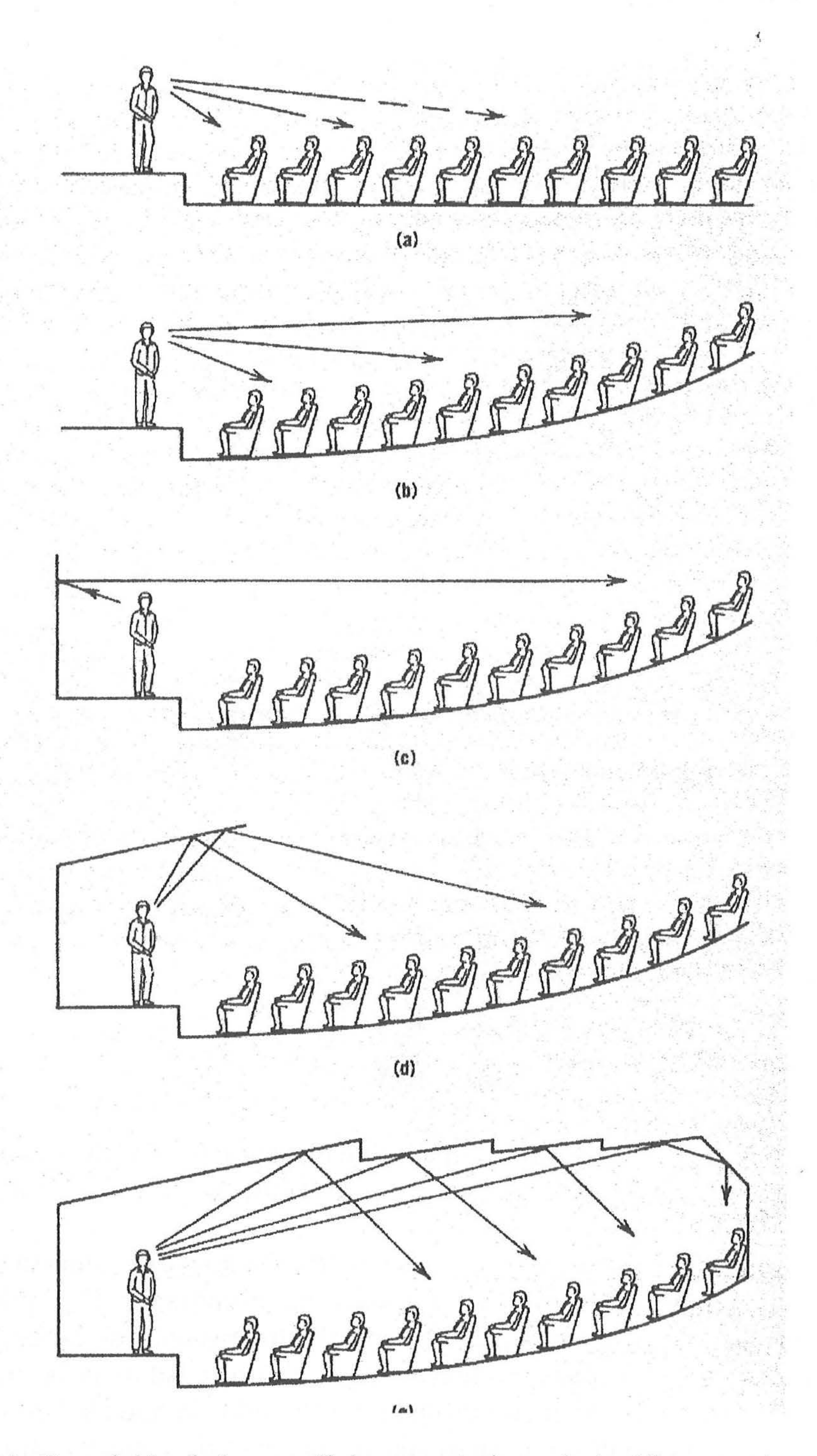


Figura 9.31: Transición de las condiciones acústicas al aire libre y en interiores

La figura 9.31 muestra la transición de las condiciones acústicas al aire libre y en interiores. Las cuatro primeros corresponden a situaciones al aire libre: suelo plano horizontal, suelo plano inclinado sin reflector, con reflector y concha. En último lugar se muestran las condiciones en el interior de un recinto.

9.7.- LA DIFUSIÓN DEL SONIDO

Los efectos de la difusión de las ondas acústicas en un recinto se deben principalmente a la superposición de los fenómenos de la reflexión, refracción y difracción. Existen una serie de recintos tales como salas de concierto, salas de música y estudios de grabación, donde el sonido debe ser lo más difuso posible. Para difundir el sonido en un recinto se deben colocar una serie de dispositivos, difusores, diseñados de tal forma que todo el sonido que incida sobre ellos se difunda uniformemente en todas las direcciones. La figura 9.31 muestra la comparación de las respuestas temporal y espacial, de la incidencia de una onda acústica sobre un dispositivo absorbente acústico, otro reflector y uno difusor. En el caso del dispositivo difusor la energía reflejada es elevada y con una respuesta espacial bastante uniforme.

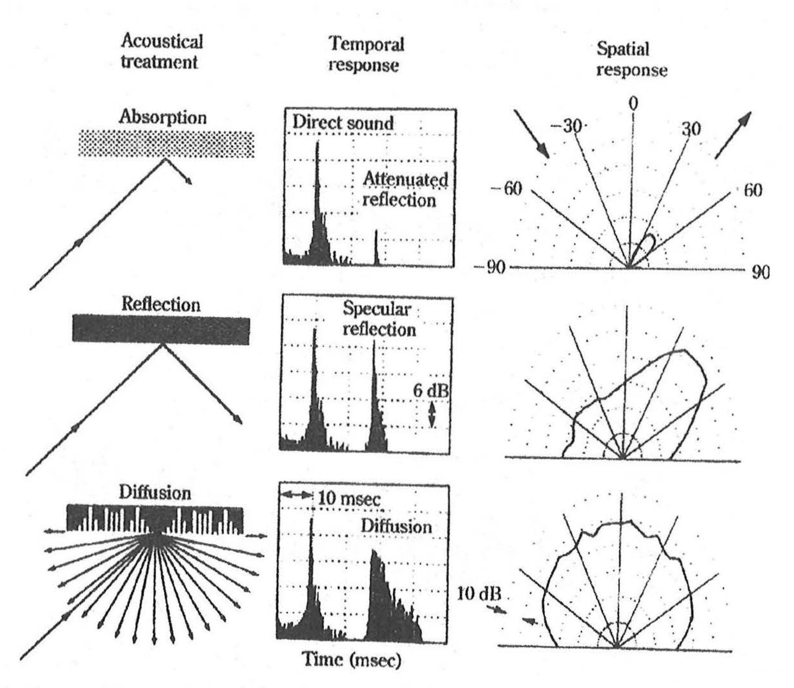


Figura 9.31: Respuesta espacial y temporal de dispositivos absorbentes, reflectores especulares y difusores acústicos.

En apartados anteriores se ha visto que las superficies convexas aumentan la difusión del sonido. Son muy utilizados los difusores policilíndricos. Cualquier superficie reflectora con irregularidades comparables con las dimensiones de la longitud de onda funcionará como un difusor. Cuanto mayor sea la aleatoriedad de la las irregularidades de la superficie y sus tamaños, mejor difundirán el sonido. Aunque la absorción acústica reduce la difusión, la colocación alternada de parches de material absorbente sobre superficies reflectoras mejora la difusión acústica. Los difusores anteriormente mencionados presentan dos grandes limitaciones: las irregularidades de las superficies deben ser grandes para ser efectivas a bajas frecuencias y no existe un procedimiento objetivo para determinar la difusión que producen.

A partir de 1975, el profesor M. Schroeder basándose en la teoría de los números desarrolló los denominados difusores de Schroeder, denominados genéricamente RPG (Reflection Phase Grating). Estos dispositivos no precisan grandes superficies irregulares y su dispersión puede ser calculada. El tipo de difusor RPG más utilizado es

el difusor de residuo cuadrático QRD (Quadratic Residue Diffusser). Un difusor de residuo cuadrático consiste en una serie de ranuras paralelas, o huecos, de igual anchura y diferente profundidad, figura 9.32. Las ranuras o los huecos están separados por elementos delgados y rígidos. La profundidad de cada ranura (hueco) varía de acuerdo con una secuencia matemática prefijada. La secuencia se repite hasta obtener el difusor del tamaño necesitado. Cada repetición de la secuencia se llama periodo. Cada periodo consiste en un número primo de ranuras o huecos. El difusor se puede proyectar para proporcionar sonido difuso dentro de un determinado rango de frecuencias. Generalmente se realizan en madera. Las figuras 9.33 y 9.34 muestran varios modelos comercializados de difusores QRD.

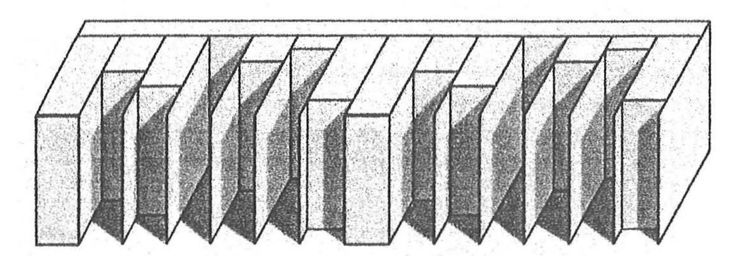


Figura 9.32: Vista de un difusor de residuo cuadrático con dos periodos.

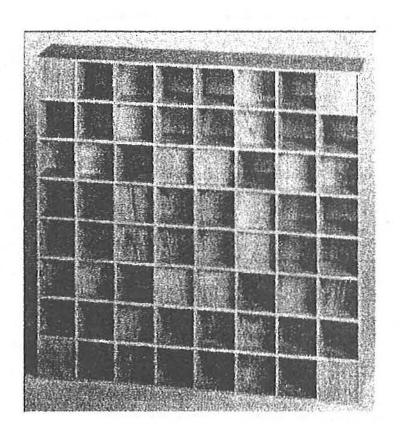


Figura 9.33: Ejemplo de difusor RPG de dos dimensiones.

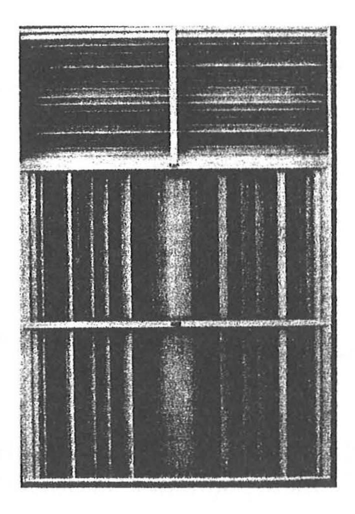


Figura 9.34: Conjunto de difusores de residuo cuadrático.

9.8.- ALGUNOS DEFECTOS DE DISEÑO ACÚSTICO

En las figuras siguientes se muestran algunos defectos acústicos que se deben evitar en la fase de proyecto.

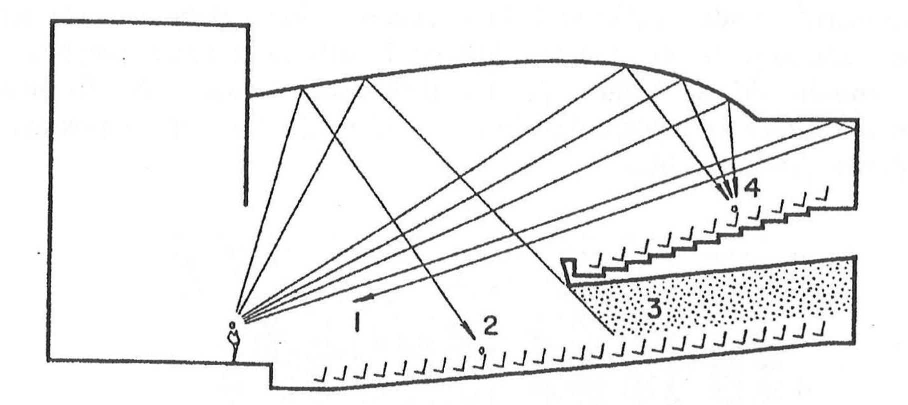


Figura 9.35: Ecos, ausencia de tratamiento acústico en la pared posterior. Excesiva altura de la sala, ondas reflejadas muy retrasadas. Sombras acústicas. Focalizaciones

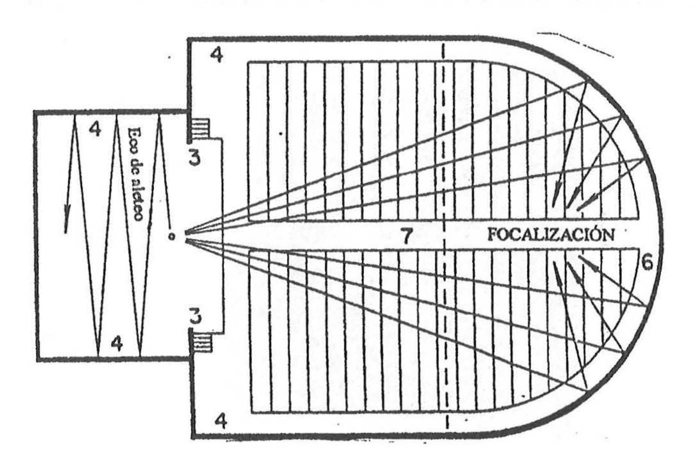


Figura 36: Focalizaciones. Ecos fluctuantes.

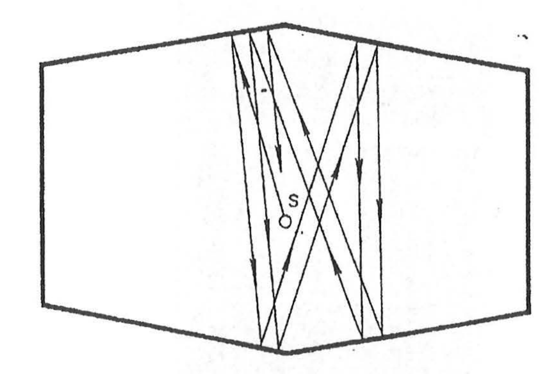


Figura 9.37: Ecos fluctuantes(flutter echo). Pueden producirse entre paredes paralelas muy reflectantes, si la fuente sonora está ubicada entre ellas.

9.9.- EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LA TEORÍA GEOMÉTRICA

DEUTSCHE OPER, BERLÍN

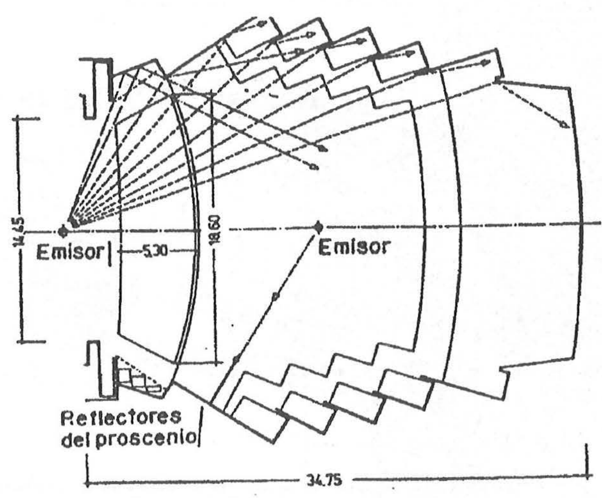


Figura 9.38: Planta de la sala

La forma especial de las paredes laterales refleja el sonido hacia los palcos y no hacia el centro como en los teatros con las paredes paralelas. Esta ordenación ofrece además una buena visibilidad del escenario

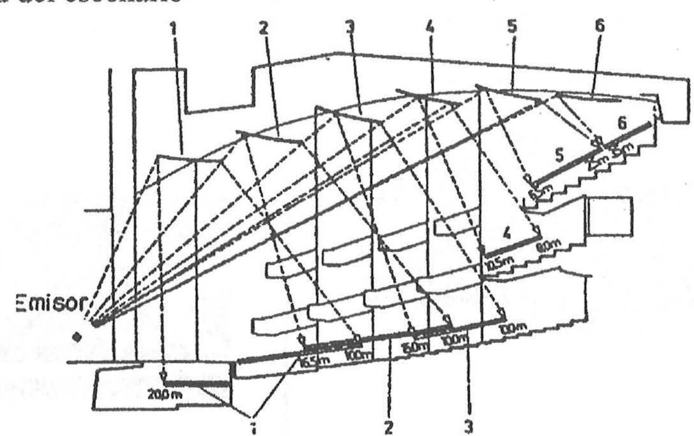


Figura 9.39: Escalonamiento del techo (Proyecto inicial).

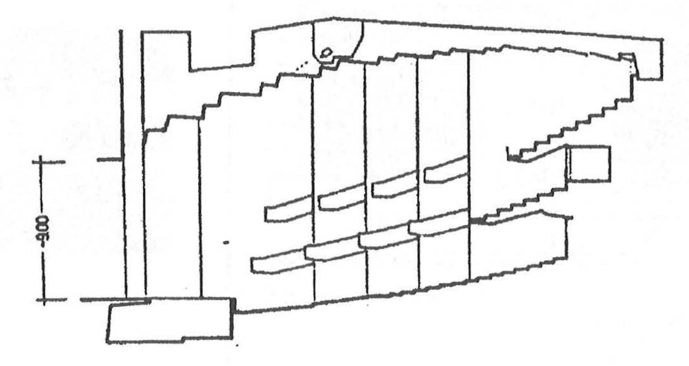


Figura 9.40: Doble escalonamiento (Solución adoptada)

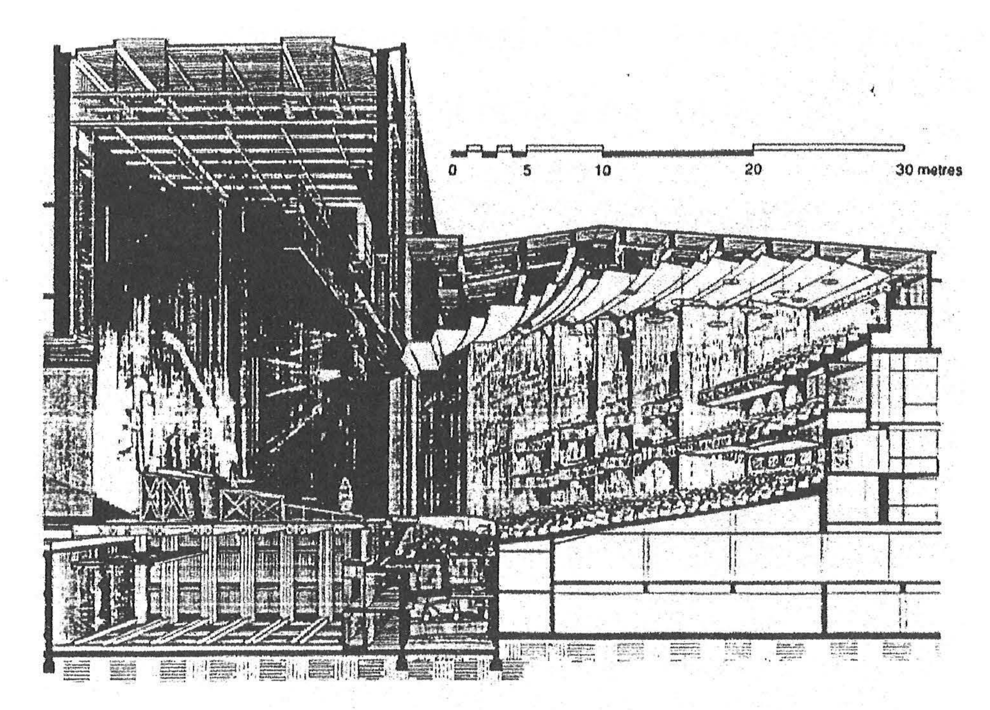


Figura 9.41: Perspectiva de la sala Deutsche Oper

CENTRO MANUEL DE FALLA, GRANADA, 1.978

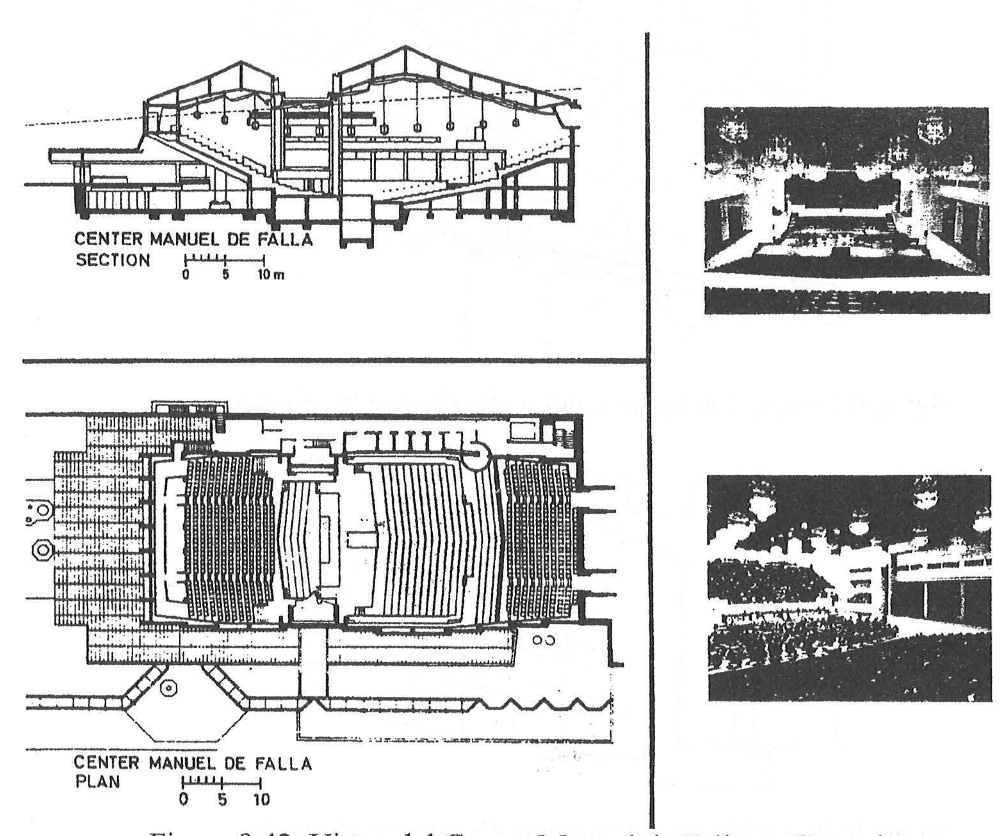


Figura 9.42: Vistas del Centro Manuel de Falla en Granada.

10 FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA ONDULATORÍA EN LOS RECINTOS

10.1.- INTRODUCCIÓN

Generalmente en el estudio del comportamiento del sonido en un recinto intervienen un amplio intervalo de frecuencias. Cuando las ondas se reflejan en los contornos del recinto se pueden producir ondas estacionarias, un hecho que no puede ser analizado desde la perspectiva de la acústica geométrica. A bajas frecuencias, las longitudes de las ondas suelen ser mayores que muchos de los objetos sobre los que inciden. Para el estudio de la acústica de un recinto de dimensiones geométricas no muy grandes, con una geometría sencilla, se suele utilizar la teoría ondulatoria. Este método teórico puede ser utilizado en situaciones muy idealizadas, pues los recintos habituales tienen formas más o menos irregulares, están amueblados, etc. y el método ondulatorio es de difícil aplicación, pues las condiciones de contorno no pueden ser descritas adecuadamente. En consecuencia, este método tiene una aplicación práctica limitada a recintos de volumen pequeño, sin embargo proporciona unas ideas cualitativas sobre el comportamiento básico del sonido en los recintos. Cada recinto tiene una frecuencia de corte por debajo de la cual se le puede considerar un recinto pequeño y el estudio modal ondulatorio es importante.

Cuando utilizamos el método ondulatorio, una sala se considera como un resonador complejo con muchos modos normales de vibración y cada modo tiene su frecuencia de resonancia, frecuencia natural o frecuencia modal. Las frecuencias naturales dependen básicamente del tamaño y forma de la sala, mientras que el amortiguamiento de las ondas depende principalmente de las condiciones de contorno. Cuando en un recinto se pone en funcionamiento una fuente sonora y sus frecuencias coinciden con las naturales del recinto, se pueden producir fenómenos de resonancia a esas frecuencias.

Los recintos pequeños con formas irregulares tienen mayor número de frecuencias naturales y las ondas estacionarias afectan menos a su acústica. Existen diversos procedimientos para determinar las proporciones entre las dimensiones de los recintos, que reducen los efectos de las frecuencias de resonancia a bajas frecuencias.

10.2.- FRECUENCIAS NATURALES DE VIBRACIÓN EN UN RECINTO ORTOÉDRICO CON PAREDES RÍGIDAS NO ABSORBENTES.

Sea un recinto ortoédrico (habitualmente denominados recintos rectangulares) con paredes rígidas no absorbentes acústicas (impedancia infinita). Las dimensiones del recinto son: L_x , L_y y L_z . La ecuación general de la onda acústica en tres dimensiones viene dada por la expresión

$$\frac{\partial^2 p}{\partial^2 t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial^2 y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial^2 z^2} \right) \qquad [10.1]$$

p es la presión acústica o dinámica y c es la velocidad de propagación de las ondas sonoras. Se pretende determinar los modos normales de vibración de las ondas.

Las variables pueden ser separadas, lo que significa que la solución está compuesta de tres factores.

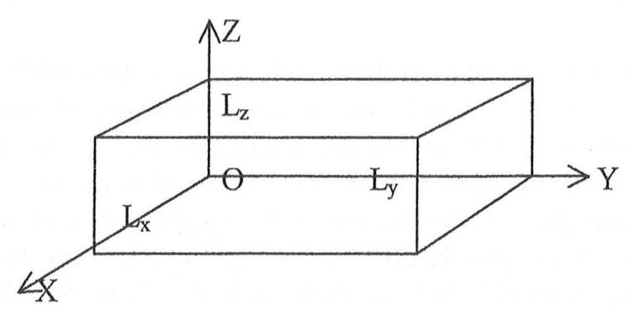


Figura 10.1: Recinto ortoédrico

Las condiciones de contorno para el recinto rectangular con paredes rígidas no absorbentes acústicas son que las velocidades de las partículas del medio son nulas en las paredes.

$$\begin{array}{lll} \text{En } x = 0, & x = L_x & v_x = 0,\ \dfrac{\partial p}{\partial x} = 0 \\ \text{En } y = 0, & y = L_y & v_y = 0,\ \dfrac{\partial p}{\partial y} = 0 \\ \text{En } z = 0, & z = L_z & v_z = 0,\ \dfrac{\partial p}{\partial z} = 0 \end{array} \qquad [10.2]$$

Los modos propios de vibración del recinto son:

$$p_{n_x n_y n_z}(x, y, z, t) = p_0 \cos k_x x . \cos k_y y . \cos k_z z . e^{i\omega t} \qquad [10.3]$$

Es la expresión general para la onda estacionaria en cualquier punto, (x,y,z), producida en un recinto rectangular con paredes rígidas, es la suma de ocho ondas planas. Al sustituir [10.2] en [10.3] se obtiene

$$k_x = \frac{n_x \pi}{L_x} \quad ,k_y = \frac{n_y \pi}{L_y} \quad ,k_z = \frac{n_z \pi}{L_z} \qquad n_x, n_y, n_z = 0,1,2,3,.. \qquad [10.4]$$

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} \qquad [10.5]$$

$\frac{k_x}{k}, \frac{k_y}{k}, \frac{k_z}{k}$ son los cosenos directores de las ondas de propagación respecto de los ejes coordenados.

n_x, n_y, n_z indican el número de planos de presión nula que ocurren a lo largo de los ejes OX, OY, y OZ respectivamente.

Las frecuencias naturales correspondientes a los modos propios de vibración del recinto son:

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \qquad [10.6]$$

La menor frecuencia natural o de resonancia del recinto viene dada por la expresión:

$$f = \frac{c}{2L_{\text{máx}}} \qquad [10.7]$$

Cuando $n_y = n_z = 0$, la ecuación general de la presión de la onda estacionaria coincide con la ecuación de una onda plana en un tubo largo y estrecho, cerrado con terminaciones rígidas en $x = 0$ y $x = L_x$.

Los tres tipos de modos de vibración, ondas estacionarias, que pueden ocurrir en un recinto rectangular son:

1) Modos axiales

Las ondas componentes se mueven paralelamente a un eje, es decir se desplazan en una dirección, dos de los índices n_x, n_y, n_z son nulos. Los modos axiales son los que más contribuyen a las propiedades acústicas de un recinto. Estos son los modos que pueden producir los ecos fluctuantes.

Ondas axiales al eje OX, paralelas al eje OX, $(n_x, 0, 0)$, $n_x \neq 0$
Ondas axiales al eje OY, paralelas al eje OY, $(0, n_y, 0)$, $n_y \neq 0$
Ondas axiales al eje OZ, paralelas al eje OZ, $(0, 0, n_z)$, $n_z \neq 0$

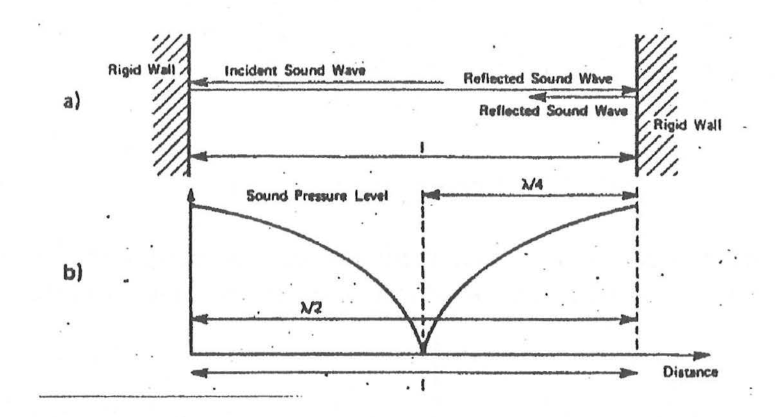


Figura 10.2: Modo axial con su correspondiente patrón de presión

2) Modos tangenciales

Corresponden a los sistemas de ondas estacionarias perpendiculares a una de las paredes, se mueven paralelas a un plano, xy, yz o xz. Las ondas componentes son tangentes a un par de superficies, pero son reflejadas desde otro par. Son bidimensionales y un índice n es igual a cero.

Ondas tangenciales paralelas al plano YZ	$(0, n_y, n_z)$
Ondas tangenciales paralelas al plano XZ	$(n_x, 0, n_z)$
Ondas tangenciales paralelas al plano XY	$(n_x, n_y, 0)$

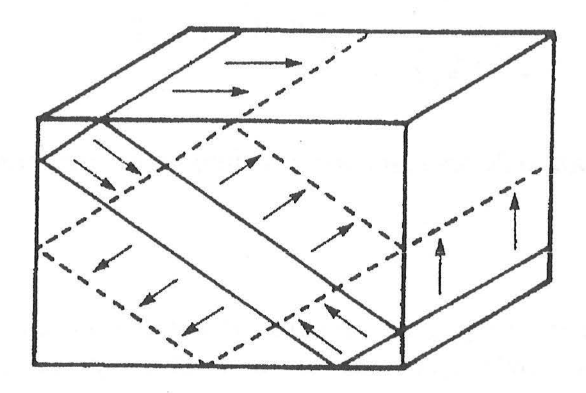


Figura 10.3. Modo tangencial

3) Modos oblicuos

Las ondas componentes son oblicuas y en consecuencia inciden sobre las seis superficies del recinto. No hay ningún índice n nulo.

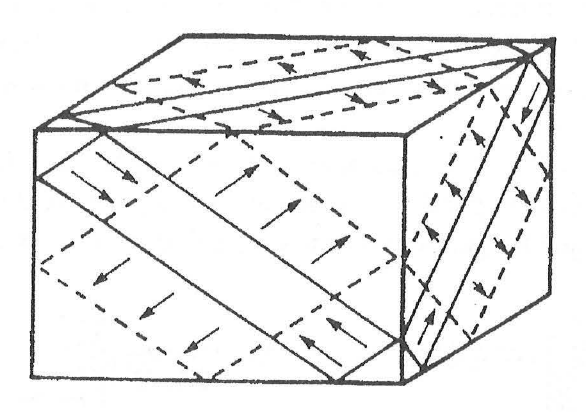
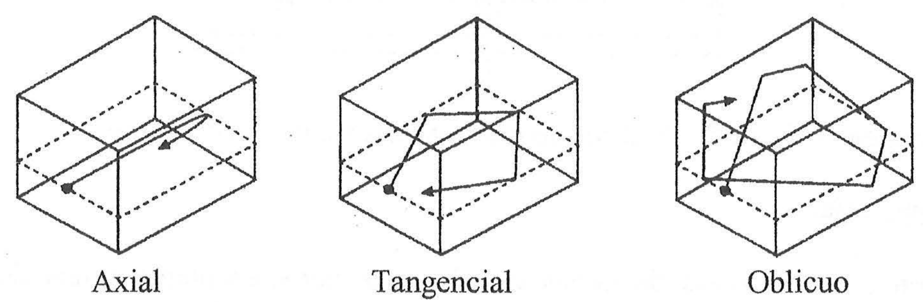


Figura 10.4. Modo oblicuo (1,1,1)

En la figura 10.5, de manera no rigurosa, mediante un procedimiento basado en las reflexiones especulares, se visualizan los modos axiales, tangenciales y oblicuos.



Axial Tangencial Oblicuo

Figura 10.5: Visualización de los modos axiales, tangenciales y normales.

Las ondas oblicuas tienen un recorrido menor, experimentan un mayor número de reflexiones por segundo y se amortiguan antes que las demás. Posteriormente se anulan las tangenciales y las que se extinguen más lentamente son las axiales. Esta forma de extinción afecta al tiempo de reverberación del recinto. Los modos axiales son los que tienen más energía acústica. Los modos tangenciales tienen la mitad de energía que los modos axiales, y los modos oblicuos la cuarta parte.

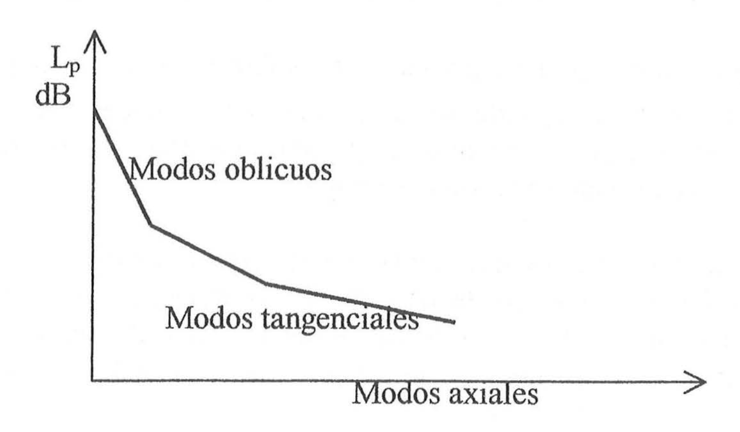


Figura 10.6: Decrecimiento de los modos propios de una sala

Cuando un sonido es emitido dentro de un recinto, mientras la fuente sonora esté emitiendo, los sonidos de frecuencias próximas a las de resonancia del recinto se encontrarán reforzados, coloración tonal, y decaerán más lentamente que los otros cuando la fuente sonora cese de emitir. En el recinto, la palabra suena menos natural y la música se distorsiona.

Otro inconveniente que pueden presentar las frecuencias naturales del recinto es la repartición de la energía acústica de manera desigual, favoreciendo unos puntos en detrimento de otros. En todos los casos, las ondas estacionarias se deben eliminar. Lo más seguro es construir recintos de formas irregulares que eviten formas geométricas ortoédricas, cilíndricas, esféricas, etc., la mayoría de las salas de espectáculos deben ser construidas con estos principios.

La ecuación [10.3], indica que la presión sonora de todas las ondas en un recinto ortoédrico tendrá un máximo en el vértice del mismo. En consecuencia, si la fuente sonora estuviese en un vértice, será posible excitar todos los modos propios, y si un micrófono estuviese en un vértice se estarían midiendo los picos de la presión sonora de todos los modos de vibración excitados. Si la fuente sonora estuviese en una posición de presión nula, ese modo no será excitado. Las esquinas son un buen lugar para introducir sonido en un recinto o para colocar material absorbente acústico.

10.3.- DENSIDAD DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA EN UN RECINTO CON PAREDES RÍGIDAS NO ABSORBENTES.

Si se representa al número de onda k como un vector de componentes k_x, k_y, k_z, se puede hallar el número de frecuencias naturales de vibración del recinto, por debajo de una frecuencia f. Se obtiene aproximadamente (Morse, Bolt, 1944):

$$N_f \cong \frac{4\pi V f^3}{3c^3} + \frac{\pi S f^2}{4c^2} + \frac{L f}{8c} \qquad [10.8]$$

donde:

N_f, es el número de frecuencias propias por debajo de una frecuencia f.

V, es el volumen del recinto, m^3.

$S = 2(L_x L_y + L_y L_z + L_x L_z)$, es el área total de las superficies del recinto, m^2.

$L = 4\,(L_x + L_y + L_z)$, cuatro veces la suma de las longitudes de las aristas, en m.

En la expresión de N_f, el primer término del segundo miembro representa el número de frecuencias naturales oblicuas, el segundo las tangenciales y el tercero las axiales. Cuando la frecuencia f es muy alta, predomina el primer sumando y la expresión es válida también para recintos de cualquier forma arbitraria.

Una medida de la separación entre las frecuencias de resonancia de un recinto es la densidad modal o densidad del espectro de frecuencias naturales, definida como el número de frecuencias naturales del recinto dentro de un intervalo de una frecuencia dada. El número de frecuencias naturales en una banda de frecuencia de ancho Δf, centrada en f es:

$$\Delta N \cong \left[4\pi V\left(\frac{f}{c}\right)^3 + \frac{\pi S}{2}\left(\frac{f}{c}\right)^2 + \frac{L}{8}\left(\frac{f}{c}\right)\right]\frac{\Delta f}{f} \qquad [10.9].$$

Al derivar respecto a la frecuencia en la ecuación [10.8] se obtiene

$$\frac{dN}{df} = \left(\frac{4\pi V}{c^3}f^2 + \frac{\pi S}{2c^2}f + \frac{L}{8c}\right) \qquad [10.10]$$

Si el intervalo que queremos calcular está en la zona de altas frecuencias, entonces la expresión [10.9] se puede sustituir por

$$\Delta N \cong \frac{4\pi V f^2}{c^3}\Delta f \qquad [10.11]$$

y la densidad espectral en un intervalo Δf a una frecuencia f es:

$$\frac{\Delta N}{\Delta f} \cong \frac{4\pi V f^2}{c^3} \qquad [10.12]$$

En recintos pequeños a bajas frecuencias la densidad del espectro de frecuencias naturales es pequeña, mientras que en recintos grandes es mayor, y a altas frecuencias el espectro se puede considerar prácticamente continuo.

10.4.- PROPORCIONES GEOMÉTRICAS ÓPTIMAS DE UN RECINTO ORTOÉDRICO.

En recintos pequeños las frecuencias naturales de la sala se deben distribuir uniformemente. Se debe evitar una relación de números enteros entre las dimensiones geométricas de la sala.

La proporción dimensional más antigua, conocida hoy en día como regla de oro es la que da las proporciones $\sqrt{5}-1:2:\sqrt{5}+1$, o una relación aproximada 2:3:5, ha sido recomendada durante muchos años. Generalmente se considera adecuado seleccionar valores de $2^{n/3}$ o $5^{n/3}$. Por ejemplo $1:\sqrt[3]{5}:\sqrt[3]{25} \approx 1:1{,}7:2{,}9$. Se han propuesto muchas reglas, pero una que engloba a la mayoría de las propuestas es la de Bolt.

En 1946, Bolt publicó un estudio de la distribución de las frecuencias propias en un recinto y elaboró un gráfico para hallar las proporciones de sus dimensiones para que las primeras 25 frecuencias naturales ofrezcan un espaciado regular. En la figura 10.7 se muestra la gráfica de Bolt. Para que se cumpla el requisito anterior, las proporciones deben de estar en la zona A. La arista de menor longitud se considera como 1.

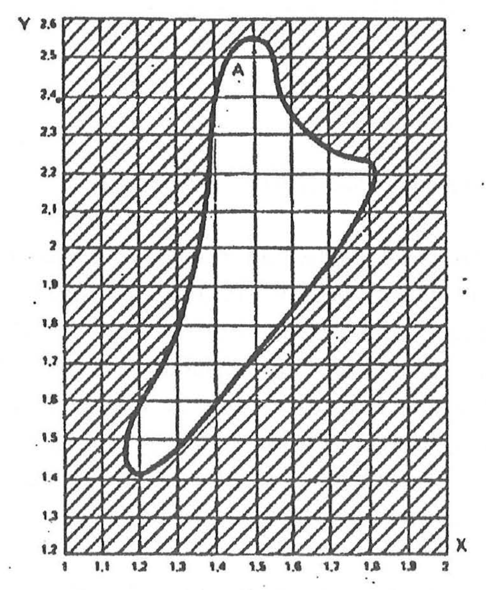


Figura 10.7: Grafica de Bolt.

La validez de esta gráfica queda limitada a una banda de frecuencias decreciente con el volumen. Teorías más actuales prueban que las proporciones de una sala pueden ser seleccionadas con unos límites más amplios que los propuestos por Bolt.

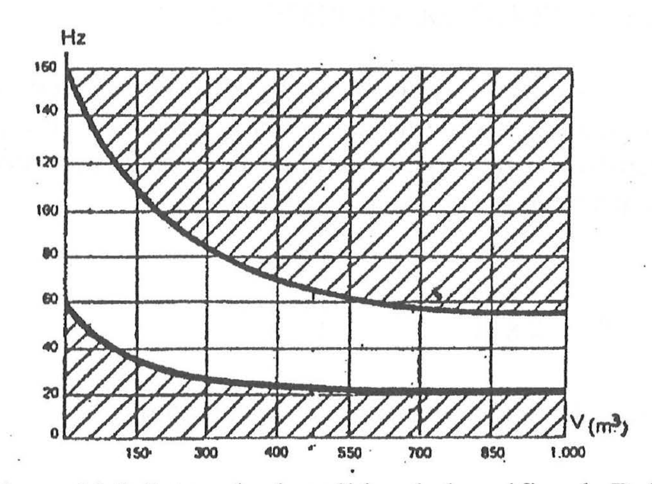


Figura 10.8: Intervalo de validez de la gráfica de Bolt.

Según un trabajo realizado por Louden en 1971, para que un recinto rectangular pequeño tenga una buena distribución de frecuencias naturales, algunas de las relaciones entre las dimensiones preferidas son por orden de calidad:

Orden de calidad	Arista de longitud menor	Arista de longitud intermedia	Arista de longitud mayor
1	1.0	1,4	1,9
2	1.0	1,3	1,9
3	1.0	1,5	2,1
4	1.0	1,5	2,1
5	1.0	1,2	1,5

Criterio de la densidad de modos (Bonello).

En 1977, el argentino Bonello propuso un nuevo método para determinar mediante cálculo las proporciones deseables para un recinto. El método está basado en calcular todas las frecuencias naturales del recinto que hay por debajo de 200 Hz. Divide el espectro en bandas de tercio de octava obteniéndose la curva de densidad de frecuencias naturales, número de frecuencias naturales en cada tercio de octava. Se eligen bandas de tercio de octava porque se aproximan a las bandas críticas mínimas en las que el oído humano puede discriminar. Después de calcular el número de frecuencias naturales en cada banda de tercio de octava se representan gráficamente.

Las condiciones para que un recinto tenga una buena distribución de frecuencias naturales son:
1.- La función debe ser monótona creciente o, a lo sumo, tener el mismo número de frecuencias naturales en dos bandas de tercio de octava consecutivas.
2.- No deben existir frecuencias naturales repetidas. En caso de existir únicamente se toleran en tercios de octava de densidad de frecuencias naturales mayor que cinco.

10.5.- FRECUENCIA DE CORTE DE UN RECINTO

Manfred Schröder ha definido la frecuencia de corte de un recinto, como aquella a partir de la cual un gran número de modos propios del recinto están excitados por la fuente sonora y el campo acústico en el recinto puede considerarse difuso. La frecuencia de corte se obtiene a partir de la expresión:

$$f_c = \sqrt{\frac{c^3 T_{60}}{8{,}8V}} \approx 2000\sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad Hz \qquad [10.13]$$

T_{60} es el tiempo de reverberación de la sala y V el volumen.

Por debajo de la frecuencia de corte tenemos un *recinto pequeño* y hay que tener en consideración sus modos propios. Es únicamente en los recintos pequeños en los que hay una parte importante de las frecuencias por debajo de la frecuencia de corte.

Cuando estudiamos la acústica de recintos cerrados es conveniente considerar el rango audible (16 Hz – 20kHz), dividido de forma arbitraria en cuatro regiones, separadas por

las frecuencias: f_1, la menor frecuencia de resonancia de la sala; f_c la frecuencia de corte y $f_3 = 4\ f_c$

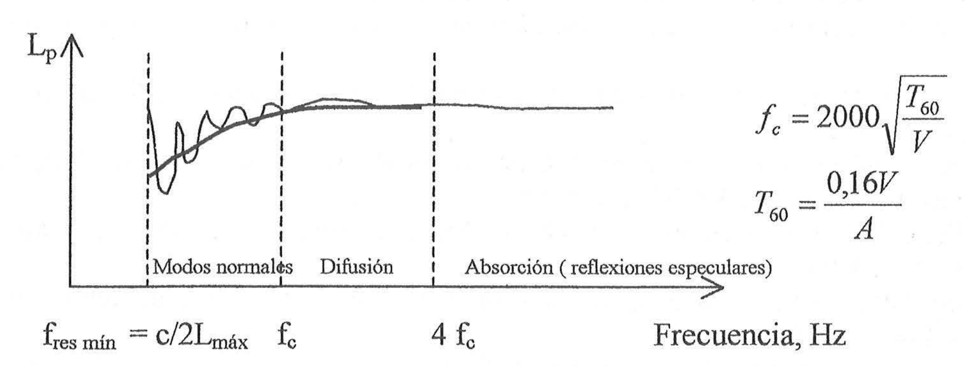
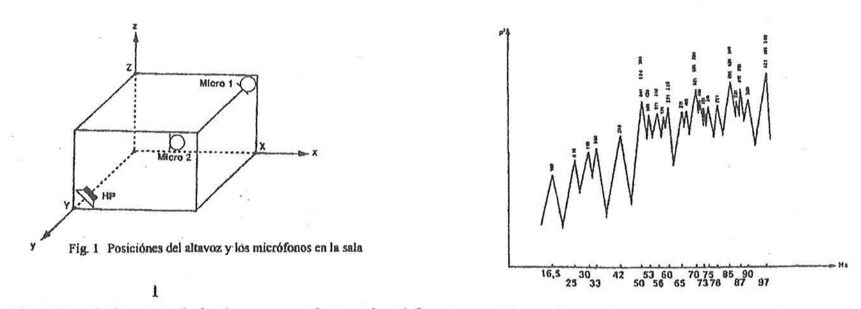


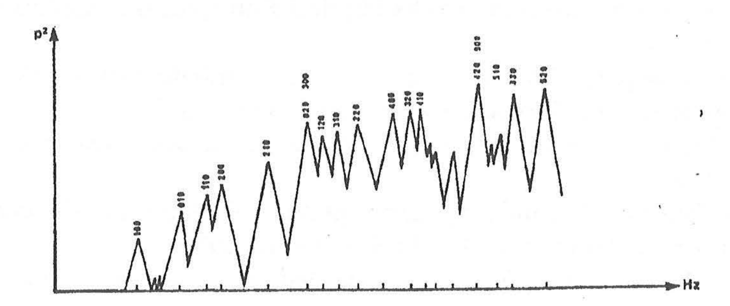
Figura 10.9: Regiones en las que se divide el rango audible para la aplicación de las diferentes teorías ondulatoria, estadística y geométrica.

EJEMPLO: Frecuencias propias de una sala de dimensiones 10,2x6,8x3,4 m^3

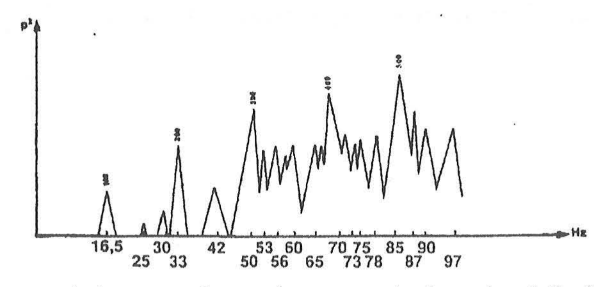
Se muestra la respuesta en frecuencia entre 20 y 100 Hz de la sala. La distribución modal depende de la posición del micrófono. La amplitud de los picos depende del tratamiento acústico de los paramentos.



1) Posiciones del altavoz y los micrófonos en la sala.
2) Sala sin tratamiento acústico y micrófono en la posición 1.



3) Sala con tratamiento acústico en el suelo y el techo. Micrófono en la posición 1

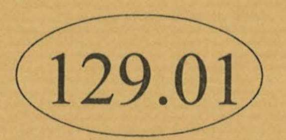


4) Sala con tratamiento acústico en suelos, techos y paredes laterales. Micrófono en la posición 1.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Barron, M., Auditorium Acoustics and Architectural Design, E&FN Spon, London, 1993.
[2] Beranek, L., Concert and Opera Halls. How they sound. Acoustical Society of America., 1.996
[3] Bolt, R.H Note on Normal Frequency Statistics in Rectangular Rooms. J,Acous. Soc. Am. 18,1, 130-133, 1946
[4] Bolt R.H. and Doak P.E.. A tentative Criterion for the short_therm Trasient Response of Auditoriums, J. Acous. Soc. Am.V2, nº4, 1950.
[5] Bonello, O.J. A new Criterion for the Distribution of Normal Room Modes. J. Audio Eng. Soc., 29,12, 905, 1981.
[6] Cremer;Muller. Principles and Applications of Room Acoustics. Vol. I, II, Applied Science Publishers. London, 1982.
[7] D'Antonio P., Konnert J.H. The Reflection Phase Grating: Design Theory and Application, J. Audio Eng. Soc., 32,4, 228-238, 1984.
[8] D'Antonio P., Konnert J.H. The QRD Diffractal: A New One-or Two-Dimensional Fractal Sound Diffusor, J. Audio Eng. Soc., 40,3, 117-129, 1992.
[9] D'Antonio P., Konnert J.H. The Directional Scattering Coefficient: Experimental Determination, J. Audio Eng. Soc., 40,12, 997-1017, 1992.
[10] Everest F.A. The Master Handbook of Acoustics, TAB Books, Mc Graw Hill, 1994.
[11] Haas, H. Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache, Acustica, 1, 49-58, 1951.
[12] Izenour, G.C. Theater Design, McGraw Hill Inc, New York, 1977.
[13] Knudsen,V.O. and Harris, C.M, Acoustical Designing in Architecture, John Wiley & Sons, N. York. 1950.
[14] Kuttruff, H. Room Acoustics, Elsevier Applied Science, London, 1991. Reprinted 1999 by Spon Press.
[15] Louden, M. M. Dimensional Ratios of Rectangular Rooms UIT Good Distribution Eigentones, Acustica, Vol 24, 101-104, 1971
[16] Morse, P.H., Bolt R. H. Sound Waves in Rooms, Reviews of Modern Physics, 16,2, 69-150, 1944.
[17] Mackenzie, R., Auditorium Acoustics, Applied science Publisher, London, 1975.
[18] Morse, P.M., Ingard K. U., Theoretical Acoustics. Princeton University Press, Princenton, New Jersey, 1968.
[19] Pierce D., Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications, McGraw-Hill, New York. 1981.
[20] Sepmeyer, L.W. Computed Frequency and Angular distribution of the Normal Modes of Vibration in Rectangular Rooms, J,Acous. Soc. Am.37,3, 413-423, 1965.
[21] Schroeder, M. Diffuse Sound Reflection by Maximum-Lenght Sequences, J. Acous. Soc. Am. 57,1, 149-155, 1975.
[22] Schroeder, M, Binaural Dissimilarity and Optimum Ceilings for Concert Halls: More Lateral Sound Diffusion, .J. Acous. Soc. Am. 65,4, 958-963, 1979.
[23] Schroeder, M. The Schroeder Frequency Revisited, J. Acous. Soc. Am. 99, 3240-3241 1996.
[24] Vorländer M. Simulation of the Transient and Steady-State Sound Propagation in Room Using a New Combined Ray-Tracing/Image Algorithm, J. Acous. Soc. Am. 86, 172-178, 1989.

CUADERNO



CATÁLOGO Y PEDIDOS EN
http://www.aq.upm.es/of/jherrera
mairea@ctv.es

